

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES INFORMATIQUES

Réalisation d'un logiciel d'aide à la prospection sismique

REMY, Thierry

Award date:
1988

Awarding institution:
Université de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

FACULTES UNIVERSITAIRES N.D. DE LA PAIX
NAMUR

INSTITUT D' INFORMATIQUE

REALISATION D'UN LOGICIEL D'AIDE
A LA
PROSPECTION SISMIQUE

Thierry REMY

Mémoire présenté pour l'obtention du grade
de Licencié et Maître en
informatique
par

Promoteur :

Professeur B. Le Charlier

Thierry REMY
1987 - 1988

Toute connaissance exige un concept,
si imparfait ou si obscur qu'il puisse être.

KANT. Critique de la raison pure, 1781

A Martine

REMERCIEMENTS

Au seuil de ce travail, je prie tous ceux qui m'ont encouragé de bien vouloir trouver ici l'expression de ma gratitude.

Je tiens à remercier vivement :

Monsieur le Professeur B. Le Charlier d'avoir accepté d'être le promoteur de ce mémoire; ses critiques et suggestions me furent d'un grand secours pour mener à bien ce travail;

Monsieur E. Le Charlier pour avoir proposé ce sujet et fourni quelques explications;

Messieurs les Professeurs G. Cardinael , P. Overlau des Facultés des Sciences et

Monsieur L. Alleux de l'université de Liège pour leurs avis éclairés;

Monsieur M. Derroitte pour son aimable collaboration;

Mes parents pour m'avoir permis de réaliser ces études.

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION	1
Chapitre 1 :	4
1. THEORIE RELATIVE A LA SISMIQUE REFRACTION	4
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 BREF HISTORIQUE ET UTILITES DE LA REFRACTION SISMIQUE	4
1.2.1 Historique	4
1.2.2 Utilités	5
1.3 MISE EN OEUVRE SUR LE TERRAIN	7
1.4 THEORIE RELATIVE A LA SISMIQUE REFRACTION	8
1.4.1 Caractéristiques des ondes	8
1.4.2 Concepts de base	10
1.4.2.1 Principe d'Huyghens	10
1.4.2.2 Notion de rayons sismiques	11
1.4.2.3 Loi Snell	12
1.4.2.4 Hypothèses suivies en réfraction sismique	13
1.4.3 Réalisation et interprétation des courbes temps-distance	14
1.4.4 Limites et désavantages de la réfraction sismique	19
1.4.4.1 Présence d'un terrain mince	19
1.4.4.2 Présence d'un terrain lent intercalé	20
1.4.4.3 Correction des profondeurs de tir	21
1.4.5 Les points spéciaux	22
1.4.5.1 Introduction	22
1.4.5.2 Le points doubles	23

1.4.5.3 Le points triples	29
Chapitre 2 :	45
2. LA PHILOSOPHIE MACINTOSHIEENNE	45
2.1 PRINCIPES GENERAUX	45
2.2 CONCEPTS IMPORTANTS	47
2.2.1 L'écran graphique	47
2.2.2 L'interface d'utilisation	47
2.2.3 Les routines du ToolBox et de l'O.S.	48
2.2.4 La programmation événementielle	48
2.2.4.1 Introduction	48
2.2.4.2 Gestion des événements	49
2.3 DESAVANTAGES DU TURBO-PASCAL SUR MACINTOSH	54
2.3.1 Pauvreté du nombre de fonctions trigonométriques	54
2.3.2 Directive de compilation manquante	55
Chapitre 3 :	56
3. DESCRIPTION DE L'ARCHITECTURE LOGICIELLE	56
3.1 LES FONCTIONS DU LOGICIEL	56
3.2 L'ARCHITECTURE LOGICIELLE	57
3.2.1 Introduction	57
3.2.2 Description	59
Chapitre 4 :	62
4. MEMORISATION DES DONNEES	62
4.1 UTILITE ET DESCRIPTION DES LISTES CHAINEES	62
4.1.1 Listes attachées au modèle de terrains	62

4.1.2	Listes attachées aux points doubles	65
4.1.3	Liste attachée aux points triples	65
4.1.4	Listes attachées aux géophones	66
4.2	UTILITE ET DESCRIPTION DES FICHIERS	66
4.2.1	Fichier des dromochroniques	66
4.2.2	Fichier du modèle de terrains	68
4.2.3	Fichier de modification du modèle	68
4.2.4	Fichier d'intersection	69
4.2.5	Fichier du parcours d'un rayon	69
Chapitre 5 :		72
5.	ANALYSE DE LA PROCEDURE DE TRACAGE DES RAYONS SISMIQUES	72
5.1	PRINCIPE GENERAL DU TRAITEMENT	72
5.2	DETAIL DE L'IMPLEMENTATION	74
5.2.1	La procédure d'initialisation	74
5.2.1.1	Description de la procédure	75
5.2.2	La procédure de détermination du parcours entre couches successives	79
5.2.2.1	Description de la procédure	80
5.3	SPECIFICATIONS DES PROCEDURES IMPORTANTES	87
5.3.1	Spécifications pour la procédure d'initialisation	87
5.3.2	Spécifications de la procédure de détermination du parcours	89
Chapitre 6 :		96
6.	SOLUTIONS APORTEES A QUELQUES PROBLEMES RENCONTRES	96

6.1	NIVEAU DE L'INTERFACE	96
6.1.1	Enregistrement du modèle de terrains	96
6.1.2	Modification du modèle	102
6.2	NIVEAU PROCEDURE DE CALCULS	102
6.2.1	Traitement de la réfraction totale	103
6.2.1.1	Principe de la procédure	103
6.2.1.2	Détail de l'implémentation	104
6.2.1.2.1	Procédure principale	104
6.2.1.2.2	Procédure auxiliaire importante	107
6.2.2	Traitement d'un cas spécial	108
6.2.3	Spécifications des procédures importantes	109
Chapitre 7 :		114
7.	CRITIQUE DU LOGICIEL	114
7.1	HYPOTHESES POSEES	114
7.2	AVANTAGES ET INCONVENIENTS	117
7.2.1	Avantages	117
7.2.2	Inconvénients	119
7.3	PERFECTIONNEMENTS ENVISAGES	120
7.4	COMPARAISONS EFFECTUEES	121
CONCLUSION		123
BIBLIOGRAPHIE		124

INTRODUCTION

La prospection sismique est employée pour l'obtention d'informations concernant les différentes couches géologiques présentes dans le sous-sol : vitesses, profondeurs, profils... Elle est devenue particulièrement utile dans le domaine de l'ingénierie civile ainsi que pour la découverte et l'évaluation de gisements de ressources naturelles souterraines.

La réalisation d'une expérience sur le terrain nécessite l'emploi d'un dispositif sismique composé d'une source d'ondes et de récepteurs placés en surface. Les enregistrements des temps de parcours des ondes se propageant via les milieux géologiques et atteignant les capteurs fournissent une courbe expérimentale.(fig.1).

Un des objectifs majeurs consiste à obtenir une représentation fidèle de la disposition des configurations géologiques. Pour ce faire, diverses méthodes basées sur l'analyse minutieuse d'un ensemble de courbes expérimentales permettent la construction d'un profil susceptible de correspondre à la réalité. Malheureusement, ces méthodes sont généralement applicables pour des situations simples. En effet, la présence de configurations complexes dans le sous-sol peut fausser les déductions et entraîner des erreurs de près de 20% dans l'évaluation des profondeurs de certains milieux.

Le logiciel réalisé se base sur une méthode permettant d'éviter ces inconvénients :

Un modèle de terrain susceptible de ressembler à la situation géologique réelle est proposé par l'utilisateur. Dès lors, en fonction de la localisation des éléments du dispositif sismique et des caractéristiques des couches géologiques, une procédure informatique tenant compte des temps de parcours dans le sous-sol de rayons issus de la source fournit une courbe théorique.

L'activation de cette procédure utilisant un modèle de terrain successivement modifié par l'utilisateur permet une approximation de plus en plus précise de la courbe théorique et expérimentale.

La confrontation étant jugée satisfaisante, le modèle de terrains obtenu doit représenter au mieux la disposition réelle des configurations géologiques.

L'application de cette méthode nécessite la réalisation d'une interface agréable afin de faciliter

le travail de l'utilisateur.

L'efficacité de la technique réside dans le fait que les situations les plus complexes sont considérées : terrain lent intercalé, déclinaisons importantes des couches, présence de gorges dans le sous-sol... Leurs influences sur les trajectoires des ondes sont étudiées permettant ainsi l'obtention de résultats précis.

Le logiciel a été réalisé sur un micro-ordinateur "Macintosh-Plus" en Turbo-Pascal.

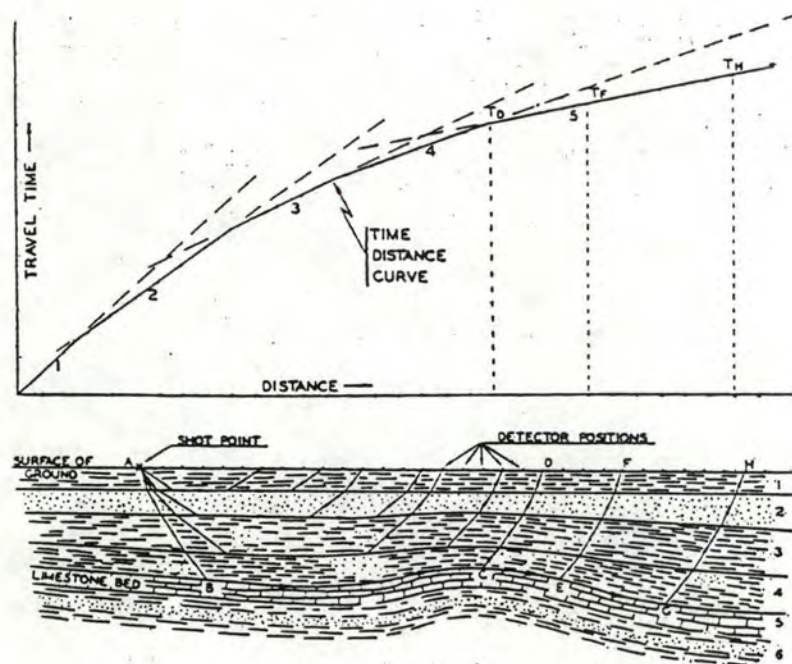


Figure 1. Courbe expérimentale obtenue pour un dispositif sismique fixé.(réf.[12])

La théorie ainsi que les concepts importants constituant les fondements de l'application sont présentés au premier chapitre de ce travail. Les caractéristiques techniques et informatiques du "Macintosh" sont énoncées au second chapitre. Le troisième chapitre contient une description de l'architecture logique choisie. La manière dont sont mémorisées les informations ainsi que la structure générale de la procédure permettant de déterminer les parcours des ondes dans les milieux

sont dévoilés aux chapitres 4 et 5. Enfin, les solutions apportées à quelques problèmes rencontrés et les critiques portant sur le logiciel constituent le sixième et septième chapitre.

Quelques exemples d'applications, les spécifications détaillées des procédures et fonctions intervenant dans le logiciel, un listing complet ainsi qu'un mode d'emploi détaillé sont présentés dans un second volume.

Chapitre 1

THEORIE RELATIVE A LA SISMIQUE REFRACTION

1.1 INTRODUCTION

Si en un point du sol, on provoque un ébranlement, il se propage de proche en proche en s'amortissant; le temps nécessaire pour qu'il atteigne des récepteurs en surface dépend de la nature et de la disposition des formations géologiques. La prospection sismique a pour base l'étude de ce temps de propagation.

Deux méthodes sont utilisées pour l'enregistrement de ces temps : la **sismique réfraction** et la **sismique réflexion**.

Seule la première de ces méthodes relative à la réfraction retiendra notre attention.

1.2 BREF HISTORIQUE ET UTILITES DE LA REFRACTION SISMIQUE

1.2.1 HISTORIQUE

La méthode d'investigation utilisant la réfraction sismique apparaît en 1919, quand un géophysicien allemand, L. Mintrop, emploie la transmission d'ondes sismiques pour l'identification des couches géologiques proches de la surface. La même année, aux Etats-Unis, les principes de la méthode étaient analysés et mis en pratique par E.V. McCollum.

Dans les années trente, la sismique réfraction était devenue un outil indispensable pour la résolution de problèmes de génie civil et d'exploitation pétrolière. Cette méthode fournissant des résultats à moindre frais connut un engouement important. D'énormes progrès furent poursuivis dans le perfectionnement des divers instruments ainsi que dans les techniques d'interprétations.

Au début des années cinquante, la détermination des profondeurs des diverses couches géologiques fut facilitée par l'introduction de méthodes de correction spéciales. Ces méthodes

permirent la résolution des problèmes d'interprétation résultant de conditions géologiques et topographiques particulières. Dès lors, les expériences purent être effectuées sur des terrains comportant des profils géologiques complexes.

En 1956, de nouvelles techniques d'interprétation basées sur la détermination des vitesses des milieux fournirent des renseignements détaillés sur la qualité géologique des couches.

1.2.2 UTILITES

Les informations généralement obtenues après avoir mené à bien une expérience de réfraction sismique conventionnelle - c'est-à-dire où seule l'arrivée première des ondes longitudinales a été utilisée par l'interprétation (p.8) - sont les suivantes :

- le nombre de couches géologiques présentes dans la profondeur exploitée;
- la vitesse de chaque couche :
si les profondeurs sont calculées aux points d'impacts ainsi qu'aux récepteurs, un relief continu et détaillé est obtenu sur toute la longueur du dispositif sismique. Dès lors, le risque de ne pas dévoiler une section de terrain intéressante pour la réalisation d'une construction est évité;
- la qualité des formations géologiques est révélée : une vitesse faible de l'onde dans une couche déterminée peut être le témoin de la présence de défauts, de zones de fractures ou de dépressions.

Des configurations géologiques complexes peuvent fournir des informations incorrectes. En effet, des couches extrêmement minces, un contraste de vitesse trop faible entre deux milieux successifs ou une inversion de vitesse rendent difficiles sinon impossibles les interprétations (*cfr Limites et désavantages de la réfraction sismique, p.19*).

Depuis de nombreuses années, la sismique réfraction est principalement utilisée dans le domaine de l'ingénierie civile :

- pour la réalisation de constructions souterraines telles que des tunnels, des dépôts de gaz ou de pétrole, des mines, ...

La prospection sismique est utilisée afin de déterminer la profondeur d'une couche

géologique de bonne qualité susceptible de contenir la réalisation future.

De plus, certaines sections géologiques caractérisées par un affaiblissement de la vitesse de propagation peuvent être dévoilées. Ces zones pouvant causer d'énormes problèmes lors de la réalisation du projet doivent être évitées. La réfraction sismique permettra de trouver la meilleure alternative afin de résoudre ce problème. Enfin, la connaissance de la nature des formations géologiques ainsi que de leurs différentes profondeurs donne une estimation du coût du travail d'excavation relatif au projet;

- pour la construction d'édifices possédant de solides assises souterraines tels que les ponts, centrales atomiques, immeubles importants, ...

Dans ce cas, il est important de connaître la profondeur exacte d'une couche géologique résistante. De plus, l'analyse des vitesses des ondes sismiques permet l'évaluation des risques liés à la possibilité d'infiltration d'eau dans des terrains perméables;

- pour la mise en oeuvre de certains projets nécessitant l'absence de strate résistante dans le sous-sol. Il s'agit, par exemple, de construction de canaux, de routes, de voies de chemin de fer, ...

De nouveau, l'analyse des vitesses fournit de précieux renseignements;

- pour les problèmes d'érosion et de glissement de terrain.

Des données telles que l'épaisseur, la vitesse, la composition et la résistance de formations géologiques sont une aide précieuse afin d'évaluer les risques d'un glissement de terrain ou d'érosion.

La méthode de prospection est également utilisée pour la recherche de ressources naturelles souterraines. Elle permet, en outre, l'évaluation des coûts d'exploitation ainsi que l'estimation de l'importance d'un gisement.

En plus de ces informations géologiques, l'aspect économique de la méthode joue un rôle important.

Sa mise en oeuvre est rapide. De ce fait, en fonction des données récoltées, l'évaluation de différentes solutions afin de mener à bien un projet est beaucoup plus simple.

L'obtention d'un profil des couches permet de minimiser les coûts relatifs à des méthodes

d'investigation coûteuses tels que les forages. Ceux-ci peuvent être effectués aux endroits les plus intéressants révélés par l'analyse plutôt que d'être réalisés au hasard. Un forage donne des informations précises uniquement dans une zone proche du puits creusé. Les renseignements obtenus par un ensemble de forages ne peuvent représenter correctement les conditions géologiques régnant sur le site de prospection. Il est donc préférable d'utiliser la prospection sismique fournissant des profils beaucoup plus représentatifs de la réalité géologique et de les vérifier ensuite par la méthode des forages.

1.3 MISE EN OEUVRE SUR LE TERRAIN

En sismique réfraction, l'ébranlement du sol est presque toujours provoqué au moyen d'explosifs. Le choc d'un lourd marteau sur une plaque métallique posée par terre n'est, en général, plus décelable par des récepteurs ordinaires au-delà de quelques dizaines de mètres.

Les explosifs les plus couramment employés sont des gélamines au nitrate d'ammonium présentées en cartouches, dont le poids varie d'une centaine de grammes à quelques kilogrammes.

On utilise des détonateurs électriques à "retard zéro". En effet, lors de l'interprétation des résultats, il est primordial de disposer de l'instant de l'explosion comme point de repère. Or, l'instant zéro correspond à la rupture de l'élément chauffant du détonateur, d'où la nécessité d'utiliser des détonateurs pour lesquels cette rupture et l'explosion sont simultanées.

Pour améliorer le rendement énergétique et diminuer les risques et les dégâts, les explosifs sont descendus au fond de forages bourrés ensuite avec de l'eau ou de la terre. Pour les petites charges, il suffit d'un trou de 1 à 2 mètres de profondeur. Pour les fortes charges, il faut soit multiplier les petites cavités, soit effectuer un trou de quelques dizaines de mètres de profondeur avec une soudeuse. On augmente souvent la capacité des trous par un premier tir de faible puissance qui crée une chambre où est placée la charge définitive.

La quantité d'explosifs nécessaire est très variable suivant les conditions locales. En première approximation, on peut admettre qu'elle doit être proportionnelle au carré de la distance ES entre l'explosion et le récepteur le plus éloigné si ES est inférieure à 1.000 mètres.

Les détecteurs utilisés en surface sur des terrains solides, appelés géophones, sont sensibles aux vibrations du sol. D'autres employés sous eau, nommés hydrophones, sont sensibles aux variations de pression.

Une perturbation enregistrée par un récepteur est transformée en un courant électrique transmis par câble à un sismographe. Ce dernier filtre, amplifie et enregistre le signal reçu.

L'évaluation des temps de propagation est rendu possible par la confrontation entre la trace donnant l'instant zéro, un réseau de lignes perpendiculaires représentant un intervalle de temps et les différentes informations fournies par les géophones (fig.2).

Lors d'expérience sismique, on emploie habituellement 12 ou 24 points de réceptions espacés entre 5 et 10 mètres.

Généralement, la profondeur d'investigation excède rarement 100 mètres.

1.4. THEORIE RELATIVE A LA SISMIQUE REFRACTION

1.4.1 CARACTERISTIQUES DES ONDES

L'ébranlement du sol se traduit par une émission d'ondes de déformation ou ondes élastiques.

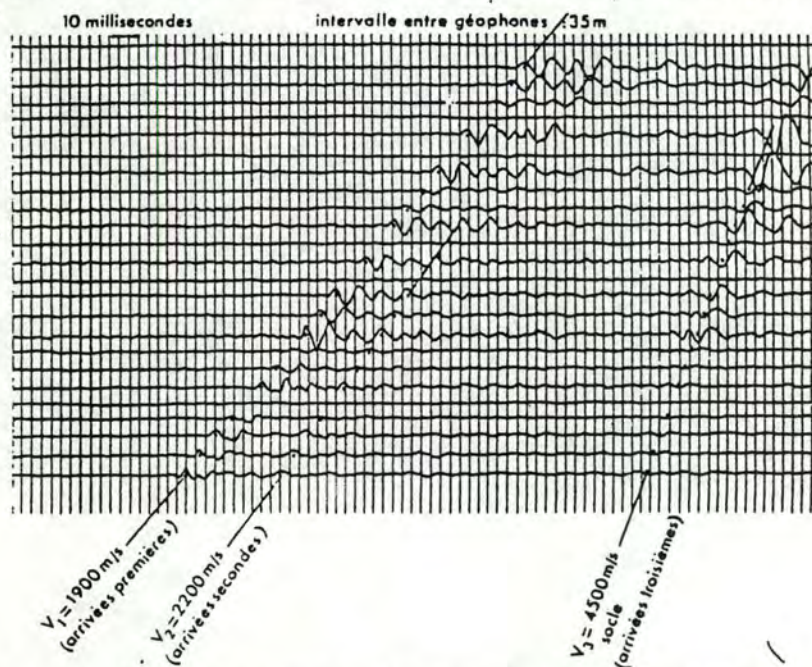


Figure 2 . Exemple d'enregistrement de sismique réfraction montrant des arrivées premières,

secondes et troisièmes (*document Compagnie Générale de Géophysique*) (réf. [1])

Parmi ces ondes, on distingue les ondes de Rayleigh qui se propagent seulement à la surface du sol, les ondes longitudinales ou ondes de compression et de dilatation et les ondes transversales ou ondes de cisaillement. La vitesse de propagation des ondes transversales est environ la moitié de celles des ondes longitudinales. Les ondes de Rayleigh sont encore plus lentes. En prospection sismique, on ne s'intéresse principalement qu'aux ondes longitudinales.

La vitesse de propagation des ondes élastiques dans le sol est comprise entre de larges limites : inférieure parfois à la vitesse du son dans les vases et les terrains superficiels meubles et secs, elle peut atteindre 6 km/sec. dans le granit. La figure 3 présente le domaine de vitesse généralement rencontré en prospection sismique.

Pour un même type de roche, elle diminue avec le degré d'altération, de fissuration ou de fracturation; elle augmente par contre avec la profondeur et l'âge géologique.

Bien qu'il soit incorrect de parler de la vitesse ou de la vélocité d'une couche et de couches lentes et rapides, on utilisera ces expressions qui sont pratiques et sont passées dans le vocabulaire géophysique courant.

Formations	Vitesse (km/s)
Air	0,33
Eau douce	1,15
Vases	0,2-0,6
Couche superficielle meuble et sèche (weathered zone)	0,2-0,6
Alluvions sèches	0,6-1,2
Alluvions humides	1,6-2,4
Argiles	1,8-2,2
Tufs volcaniques	1,8-2,5
Marnes, Craie	2-3
Gres	2-3,5
Laves	2,5-4
Calcaires et dolomies	3-5
Schistes, micaschistes	3-4,5
Gneiss, quartzites	3,5-5
Granite	4-6

Figure 3 . Vitesse des ondes sismiques en fonction des formations géologiques traversées (réf. [1]).

1.4.2 CONCEPTS DE BASE

1.4.2.1 Principe d'Huyghens

Tous les points du sol qui commencent à vibrer simultanément à la suite d'un ébranlement définissent une surface d'onde.

Le principe d'Huyghens déclare que dans un milieu **homogène et isotrope** (propriétés physiques identiques dans toutes les directions), chaque point d'une surface d'onde peut être considérée comme source secondaire d'une ondelette sphérique à l'instant t . Après un temps Δt , l'enveloppe de toutes les ondelettes ainsi générées définit un nouveau front d'onde. Ce principe est utilisé pour la construction de fronts d'onde à la condition que la vitesse du milieu ainsi que la position du front à l'instant t soient connus. La figure 4 illustre le principe.

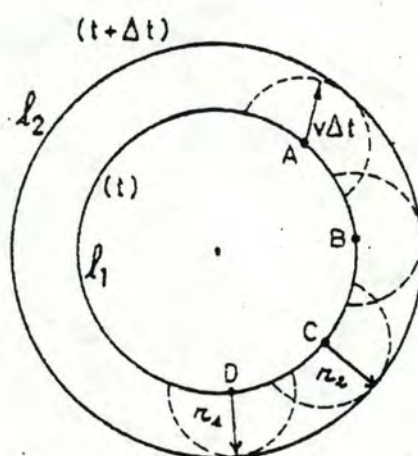


Figure 4 . Illustration du principe d'Huyghens. Les points A, B et C du front d'onde l_1 génèrent une ondelette sphérique à l'instant t . En $t + \Delta t$, l'enveloppe de ces ondelettes définit le nouveau front l_2 (réf. [2]). Les rayons sismiques sont représentés par r_1 et r_2 .

1.4.2.2 Notion de rayons sismiques

Donner une définition précise d'un rayon sismique n'est pas une tâche aisée. L'ensemble des ouvrages consultés (réf. [1], [3]) appellent rayons sismiques les rayons perpendiculaires aux fronts d'onde (fig. 4).

Cette définition simpliste ne permet pas de caractériser un rayon sismique à un instant donné. En effet, de par l'influence de certaines configurations géologiques complexes, la

détermination de la forme ainsi que de la position d'un front d'onde à un instant donné peut s'avérer être une tâche délicate. De ce fait, il est pratiquement impossible de représenter les rayons perpendiculaires à un tel front.

Ne disposant pas de notion plus précise, nous adapterons néanmoins cette définition malgré ses faiblesses.

Quoiqu'ils n'aient aucune réalité physique, les rayons sismiques sont un support plus commode pour le raisonnement que les surfaces d'onde elles-mêmes. C'est la raison pour laquelle ils seront souvent employés pour expliquer la théorie relative à la prospection sismique.

1.4.2.3 Loi de Snell

Dans un milieu homogène et isotrope, quand une onde incidente heurte une **interface**, c'est-à-dire une étendue en profondeur séparant deux milieux caractérisés par des propriétés physiques différentes, chaque point de l'interface devient source d'une onde hémisphérique. Toutes ces nouvelles ondes se propagent dans le second milieu et interagissent entre elles.

Si on considère un rayon sismique perpendiculaire au front d'onde résultant de cette interaction, son comportement peut être influencé par un des deux phénomènes physiques suivant : la réflexion ou la réfraction (**fig. 5**).

Les rayons réfractés et réfléchis sont situés dans le plan défini par le rayon incident et la **normale au contact** ou point d'incidence.

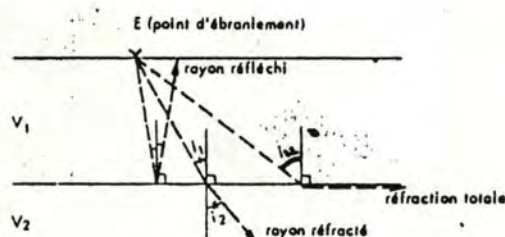


Figure 5 Rayons réfractés et réfléchis - Application de la loi de Snell

La réflexion : le rayon incident se réfléchit sur l'interface. Il se propage dans le même milieu avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence.

La réfraction : après interaction avec l'interface, le rayon se propage dans le second milieu. Les propriétés physiques étant différentes, la direction du rayon est modifiée.

La loi de Snell indique avec précision la valeur de l'angle de réfraction, formé par le rayon réfracté et la verticale à l'interface, en fonction de l'angle d'incidence et des vitesses des différentes couches : (fig. 5)

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

i_1 angle d'incidence
 i_2 angle de réfraction
 V_1 vitesse de la couche dans laquelle se propage le rayon incident
 V_2 vitesse de la couche dans laquelle se propage le rayon réfracté

Si l'angle i_1 s'accroît, l'angle de réfraction (i_2) peut atteindre la valeur limite de 90 degrés, ce qui implique évidemment que $V_2 > V_1$. Dans ce cas, le rayon se propage parallèlement à l'interface. Il subit le phénomène de réfraction totale (ou critique): (fig.5).

$$\sin i_1 = \frac{V_1}{V_2} = \sin i_{12} \quad i_{12} \text{ angle de réfraction critique}$$

Nous dirons qu'un rayon sismique incident respecte les **conditions de Snell** si la vitesse de la couche dans laquelle il se propage est strictement inférieure à la vitesse de la couche où se propage le rayon réfracté et si son angle d'incidence est inférieur ou égal à l'angle critique. La loi de Snell étant applicable en chaque point de l'interface, au fur et à mesure de sa progression, le rayon génère un rayon réfracté dans le milieu supérieur.

La sismique réfraction considère essentiellement ces phénomènes de réfraction.

1.4.2.4 Hypothèses suivies en réfraction sismique

Sauf indication contraire, il est toujours sous-entendu dans la suite de cet exposé que

les conditions ci-dessous sont respectées :

- les différentes couches du sous-sol sont homogènes et isotropes;
- le dispositif sismique, constitué par les points d'ébranlement et les récepteurs, est rectiligne;
- les différents contacts géologiques, ou interfaces, admettent le même plan perpendiculaire passant par le dispositif sismique et seuls les trajets sismiques situés dans ce plan sont pris en considération;
- la vitesse de la couche n est supérieure à celle de la couche $n-1$ afin qu'il puisse y avoir réfraction totale. En fait, la vitesse des couches géologiques augmente généralement avec la profondeur. Comme on rencontre parfois des couches à vitesse plus lente que celle des terrains sus-jacents, l'effet de telles couches sera également pris en considération;
- les temps reportés sur les diverses courbes correspondent aux ondes atteignant les premières les récepteurs.

1.4.3 REALISATION ET INTERPRETATION DES COURBES TEMPS-DISTANCE

Considérons un modèle de terrains composé de deux milieux ou couches géologiques caractérisées par des vitesses V_1 et V_2 , avec V_1 strictement inférieure à V_2 afin de permettre des réfractions totales (fig. 6).

Ces deux couches sont séparées par des plans ou interfaces parallèles à la surface du sol.

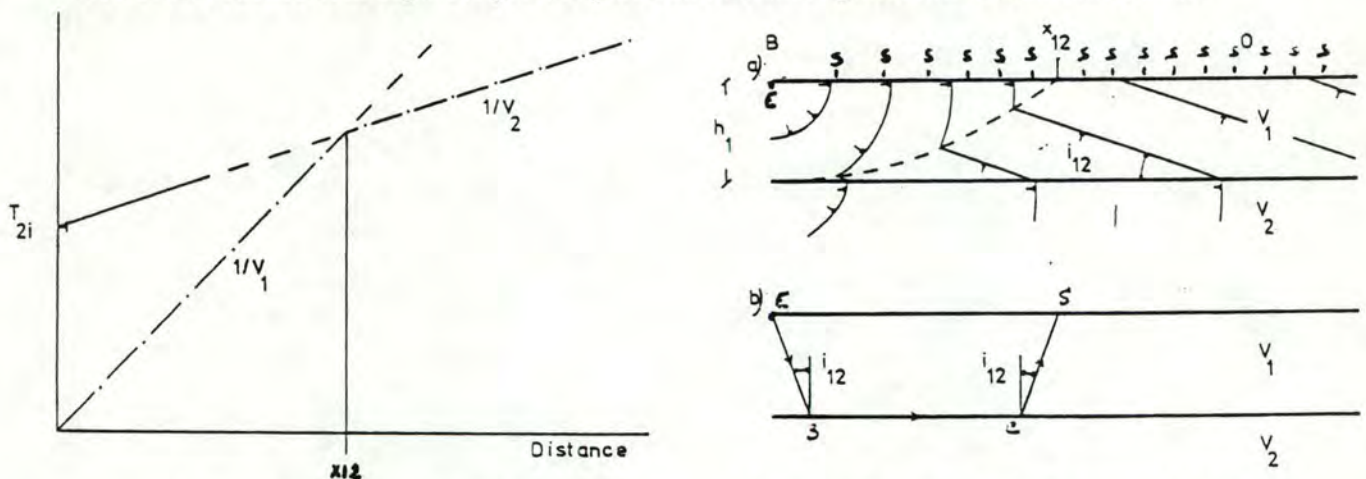


Figure 6. Dromochronique correspondant à un modèle de terrains composé de deux couches horizontales. Représentation de la propagation d'ondes et de rayons sismiques (réf. [3]).

En surface, un dispositif sismique comportant un point d'ébranlement E et des récepteurs S régulièrement espacés est mis en place. En fonction de la distance ES, si on reporte les temps nécessaires pour que les ondes premières atteignent chacun des géophones, on obtient une courbe temps-distance caractéristique des conditions géologiques locales. Cette courbe est appelée **dromochronique**.

Les ondes atteignant les premières les récepteurs sont l'onde directe au voisinage du point d'impact et les ondes réfractées lorsque la distance ES augmente.

Les ondes directes sont représentées sur la figure 6 par le premier segment de droite composant la dromochronique; les ondes réfractées par le deuxième segment.

La figure 6.a donne une représentation physique du phénomène sous forme de front d'onde tandis que la figure 6.b considère le problème à l'aide de rayons sismiques.

Pour les ondes directes, le temps de parcours est calculé en considérant la distance séparant le point d'impact au géophone fixé divisé par la vitesse de la première couche, c'est-à-dire :

$$T = d/V_1.$$

Pour les ondes réfractées, on procède comme suit :

- a) Distance du point d'impact au point B où se déroule la réfraction totale divisé par V_1
- b) Distance du point B au point C divisé par V_2 correspondant au temps de parcours en réfraction totale
- c) Distance du point C au géophone fixé divisé par V_1 .

La somme des trois valeurs obtenues donne le temps de parcours total.

L'angle d'incidence critique, i_{12} , est vérifié par la loi de Snell :

$$\sin i_{12} = \frac{V_1}{V_2}$$

Plusieurs informations importantes peuvent être fournies par la dromochronique. Dans cet exemple, on peut obtenir les vitesses V_1 et V_2 caractérisant les différentes couches ainsi que l'épaisseur du premier terrain.

Les vitesses peuvent être déterminées en calculant les pentes des droites composant la

dromochronique. L'inverse des valeurs trouvées fournit une bonne approximation (**fig. 6**). L'épaisseur de la première couche (h_1) est connue en considérant le point de rupture formé par l'intersection des deux droites constituant la courbe. La projection de ce point sur l'axe des abscisses définit la **distance critique** (x_{12}), c'est-à-dire la distance entre le point d'impact et un endroit de la surface où les temps d'arrivée des rayons directs et réfractés sont égaux. L'utilisation de relations trigonométriques fournit l'équation suivante :

$$\frac{2 h_1}{V_1 \cos (i_{12})} + \frac{x_{12} - 2 h_1 \operatorname{tg} (i_{12})}{V_2} = \frac{x_{12}}{V_1} \quad (\text{réf. [3]})$$

De par la loi de Snell, on peut exprimer h_1 sous la forme :

$$h_1 = \frac{x_{12}(1 - \sin (i_{12}))}{2 \cos (i_{12})}$$

Si les vitesses des couches sont employées plutôt que l'angle critique i_{12} , on obtient :

$$h_1 = \frac{x_{12}}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

La profondeur de la première couche peut également être déterminée en considérant le temps T_{2i} (**intercept Time**) (**fig. 6**). Ce temps résulte de l'intersection entre la prolongation de la droite caractérisant la seconde couche dans la courbe et l'axe des ordonnées.

Un calcul un peu plus complexe permet d'exprimer h_1 comme étant égale à :

$$h_1 = \frac{T_{2i} V_1 V_2}{2 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}$$

Une présentation moins sommaire de ces deux approches peut être trouvée dans la référence [3].

Si le modèle présente trois couches (**fig.7**), les angles d'incidence aux différents interfaces sont également fixés par la loi de Snell :

- pour une réfraction critique dans la deuxième couche :

$$i_{12} = \text{ArcSin}(V_1 / V_2)$$

V_1 vitesse de la première couche

V_2 vitesse de la deuxième couche

- pour une réfraction critique dans la troisième couche :

$$i_{23} = \text{ArcSin}(V_2 / V_3)$$

V_3 vitesse de la troisième couche

L'angle de réfraction sur l'interface entre les couches V_1 et V_2 d'un rayon réfracté de la couche V_3 peut s'exprimer comme suit :

$$\frac{\sin i_{13}}{\sin i_{23}} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{dès lors} \quad i_{13} = \text{ArcSin} \frac{V_1}{V_3}$$

Les trois droites composant la dromochronique résultent de l'arrivée première des ondes directes et des ondes réfractées sur les deuxième et troisième interfaces.

Les figures 7 a. et 7b. illustrent le phénomène.

D'une manière générale, pour une réfraction critique dans la $n^{\text{ème}}$ couche, l'angle d'incidence à une interface vaut : (**fig. 8**)

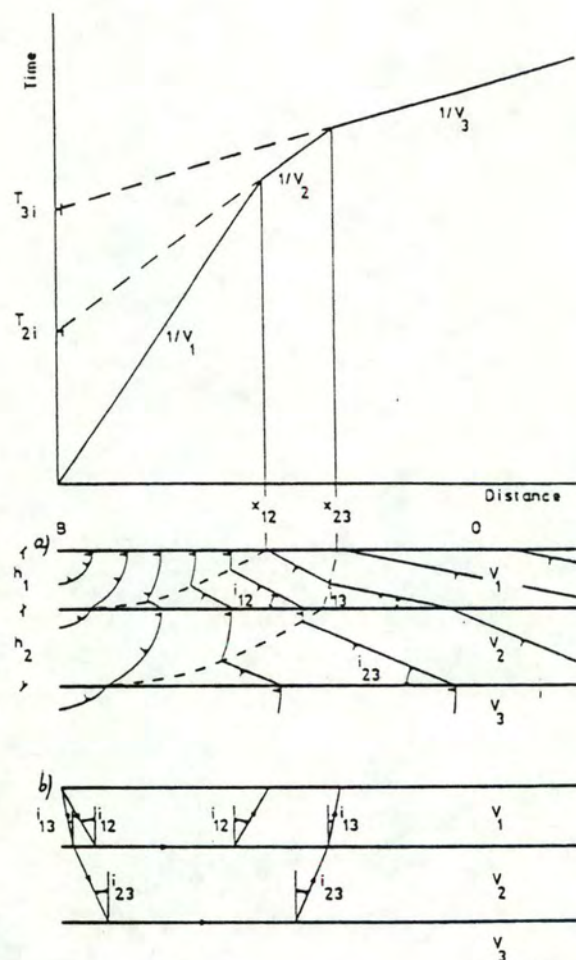


Figure 7 . Représentation du problème relatif à trois terrains séparés par des interfaces horizontales (réf. [3]).

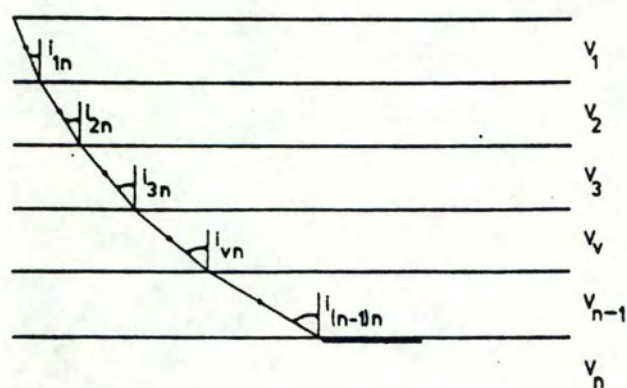


Figure 8 . Réfraction critique dans la $n^{\text{ème}}$ couche

$$\sin i_{vn} = \frac{V_v}{V_n}$$

i_{vn} angle d'incidence à la V^e interface
 V_n vitesse de la n.^e couche
 V_v vitesse de la v.^e couche

1.4.4 LIMITES ET DESAVANTAGES DE LA REFRACTION SISMIQUE

La présence de certaines configurations géologiques peut conduire à des erreurs d'interprétation.

Les exemples les plus connus sont la présence d'une couche relativement mince ou d'un terrain lent intercalé dans les formations géologiques.

1.4.4.1 Présence d'un terrain mince

Dans le cas de trois terrains, lorsque le second est mince, il est possible que les ondes réfractées au toit du troisième terrain arrivent aux récepteurs avant celles réfractées au toit du second. Si, sur la dromochronique, on ne reporte que les temps relatifs aux ondes arrivées les premières aux géophones, la courbe n'indique que la présence du premier et du troisième milieu. Dès lors, on commet une erreur par défaut dès que la profondeur du terrain V_3 est calculée. En effet, la profondeur e traversée est telle que $e_1 < e < e_1 + e_2$ (fig. 9).

On assiste au phénomène de disparition d'une couche.

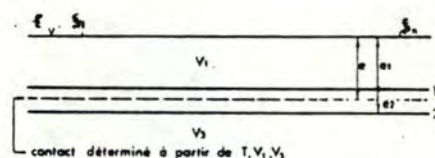
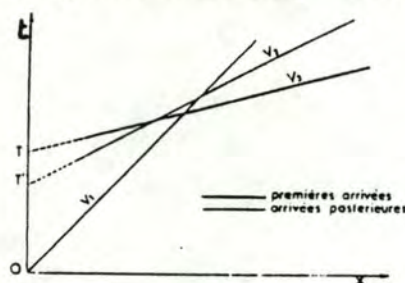


Figure 9. Phénomène de disparition d'un terrain mince (réf. [1]).

1.4.4.2 Présence d'un terrain lent intercalé

Considérons une série de trois couches caractérisées par des vitesses V_1 , V_2 et V_3 telles que $V_2 < V_1 < V_3$. Par la loi de Snell, on sait que le phénomène de réfraction totale ne peut avoir lieu au contact des deux premiers terrains. Par conséquent, la dromochronique ne comporte aucune branche de pente $1/V_2$ (fig.10).

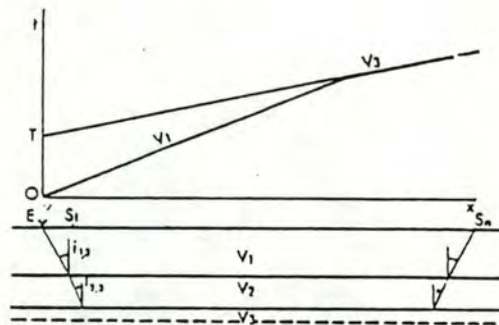


Figure 10. Présence d'un terrain lent intercalé ($V_2 < V_1 < V_3$).

Le contact (pointillés) est déterminé à partir de T , V_1 et V_3 (réf. [1]).

En déterminant la profondeur du troisième terrain à partir des seuls éléments fournis par la courbe, soit T , V_1 et V_3 , une erreur par excès est commise. En effet, la vitesse moyenne des terrains recouvrant la troisième couche est estimée à V_1 alors qu'elle est, en réalité, inférieure.

Des corrections doivent également être effectuées sur les résultats obtenus par l'expérience. Seule la correction pour une investigation à faible profondeur sera envisagée. Des informations plus détaillées sont disponibles aux références [1], [3] et [4].

1.4.4.3 Correction des profondeurs de tir

Le plus souvent, l'ébranlement du sol est provoqué par une charge explosive placée à une profondeur p . Il faut en tenir compte pour la détermination de la vitesse V_1 et de l'épaisseur

e_1 du premier terrain.

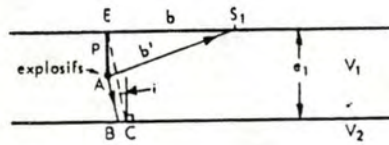


Figure 11 . Corrections de profondeur de tir (études à faible profondeur) (réf.([1])).

Détermination de la vitesse

On voit, sur la figure 11, que l'onde directe, pour atteindre le premier récepteur S1, situé à la distance b du point d'ébranlement E, parcourt la distance :

$$b' = \sqrt{b^2 + p^2}$$

Si p est important par rapport à b , il faut calculer V_1 à partir de b' et du temps correspondant au premier géophone.

Détermination de la profondeur

De plus, le temps nécessaire à l'onde sismique pour atteindre le point C (fig.11) est réduit de :

$$\Delta t = \frac{EC - AB}{v_1} - \frac{BC}{V_2} = \frac{p}{\cos i} \left(\frac{1}{V_1} - \frac{\sin i}{V_2} \right)$$

La dromochronique non corrigée donne le temps t_i (intercept time) avec une erreur par défaut égale à Δt . L'épaisseur e_1 calculée à partir de ce temps doit donc être majorée de :

$$\frac{\Delta t}{2} \frac{V_1}{\cos i} = \frac{p}{2} \quad (\text{réf.}[1])$$

1.4.5 LES POINTS SPECIAUX

1.4.5.1 Introduction

La sismique réfraction est basée principalement sur la détection de rayons directs et critiquement réfractés. Hormis ces deux types de rayons, la méthode doit tenir compte également de rayons ayant subi une réfraction non critique ou ayant été diffractés.

Le phénomène de réfraction non critique intervient quand un rayon n'est plus horizontal par rapport à l'interface rencontrée.

Une diffraction est causée par la présence de brusques changements d'inclinaison ou de modification de vitesse à l'interface de milieu.

Nous appellerons "points spéciaux" les points résultant de l'interaction entre un rayon sismique et une interface provoquant la naissance d'une diffraction.

Nous distinguerons les "**points doubles**" formés par un changement d'inclinaison dans une interface et les "**points triples**" créés par la rencontre de deux interfaces (fig.12).

Remarque importante

La théorie relative à la création de zone de diffraction peut s'avérer être complexe dans certaines situations. Malheureusement, la majorité des ouvrages consultés ([1], [3], [4]) ne se réfèrent qu'aux cas les plus généraux correspondant à des situations géologiques fréquentes. Par souci d'uniformité et d'efficacité, le logiciel se devait de traiter l'ensemble des configurations envisageables. Le manque d'information manuscrite précise ainsi que les avis quelquefois divergents de personnes compétentes m'amenèrent à réfléchir plus en détail au problème soulevé par la présence de points spéciaux.

Les explications présentes dans ce paragraphe sont le résultat d'une réflexion personnelle guidée par quelques bribes d'informations mentionnées dans les références et n'engagent en rien la responsabilité des personnes consultées. La présence d'erreurs résultant d'une mauvaise interprétation du problème est toujours possible.

Le logiciel mis au point s'appuie sur ces explications. Néanmoins, si des incohérences devaient être découvertes, seules une ou deux procédures informatiques seraient réécrites ou transformées dans le programme sans pour autant imposer une modification complète ou un abandon du

logiciel. Ce travail de transformation pourrait être exécuté en moins de quelques heures. Le lecteur considèrera donc ces quelques lignes avec circonspection.



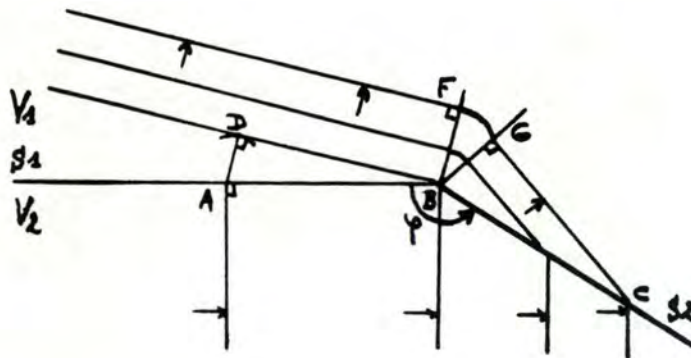
Figure 12 . Représentation d'un point double et triple

1.4.5.2 Les points doubles

Les points doubles sont créés par la présence de fortes déclinaisons dans une interface. Ce paragraphe a pour but d'expliquer les phénomènes physiques résultant de l'interaction entre un rayon subissant une **réfraction totale** et ce type de point.

Si l'interface considérée est approximée par un ensemble de segments, un point double (P.D.) représente une extrémité commune à deux segments (S1 et S2) (fig.13). Pour simplifier la représentation, on postule que le segment supportant le rayon réfracté totalement est horizontal.

De plus, le second segment formant la déclinaison est identifié par une valeur angulaire (φ) exprimée en degré par rapport à l'horizontale. L'angle est mesuré en considérant un sens antihorlogique si le rayon se propage vers la droite; horlogique si non. Le repère ainsi défini sera nommé **repère zonal** (fig.13).



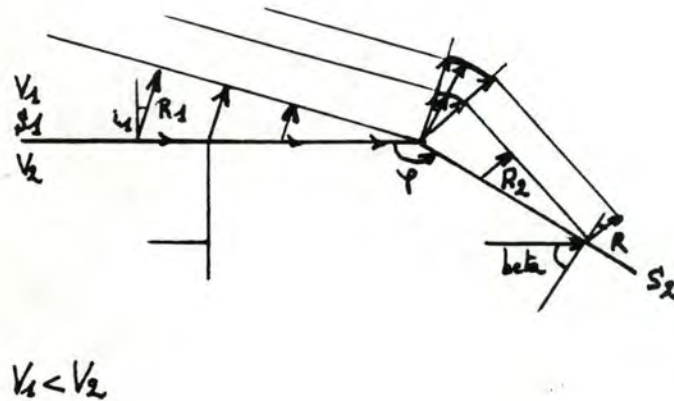


Figure 13 . Représentation de l'interaction d'une onde principale et d'un point double ($\varphi < 180$ degrés)

Deux problèmes sont envisageables : chacun d'eux sera traité en utilisant la notion de front d'onde de manière à permettre une interprétation physique des phénomènes, et en terme de rayons sismiques plus propice à une déduction mathématique.

1) $\varphi < 180$ degrés

Considérons la fig.13 . Le point double est identifié par la lettre B. L'onde se propage vers la droite dans le second milieu V_2 . Les vitesses sont telles que $V_2 > V_1$ afin de permettre une réfraction totale.

Quand l'onde passe du point A à B, le front d'onde généré dans la première couche atteint la position donnée par la ligne DB. A ce moment, le point B, conformément au principe d'Huyghens, agit comme source d'ondes. L'onde dans le second milieu continue sa progression et atteint le point C; le front d'onde émanant de la couche V_2 est représenté par la ligne GC.

Par conséquent, à l'intérieur de la zone BFG, les ondes issues de B se propagent sous forme sphérique formant une **zone de diffraction**. Dans ce cas, on peut caractériser une zone de diffraction comme étant composée d'un ensemble d'ondes sphériques permettant le raccord entre deux fronts d'onde importants.

Pour déterminer la valeur précise de l'ouverture angulaire de cette zone, il est préférable de considérer le problème sous forme de rayons sismiques.

La loi de Snell étant applicable en chaque point de l'interface, le rayon critique

réfracté longeant le segment S1 dans le milieu inférieur donne naissance à des rayons réfractés R_1 dans la couche supérieure. L'angle i_1 de réfraction est fixé par :

$$i_1 = \text{ArcSin} (V_1 / V_2)$$

Au moment où le rayon critique entre en contact avec un point du segment S2, il forme un angle β avec la verticale du segment. β est défini comme étant égal à :

$$\varphi - 90 = \beta \text{ (degrés)}$$

Un rayon réfracté R_2 est alors créé. L'angle R de réfraction vaut :

$$\text{ArcSin} (V_1 / V_2 \times \sin (\beta))$$

Les limites de la zone de diffraction étant formées par ces deux types de rayon, on en déduit que :

$$\text{Limit 1} = 270 - i_1$$

$$\text{Limit 2} = \varphi + 90 - R \text{ (degrés)}$$

Limit 1 et 2 sont exprimés en degré par rapport au segment S1 conformément au repère angulaire fixé précédemment.

L'énergie résiduelle du rayon critique réfracté au toit de l'interface est fragmentée au point B et donne naissance à une série de rayons se propageant dans le milieu supérieur dans l'ouverture angulaire de la zone.

Cette situation est fréquemment analysée dans la littérature (cfr réf. [1], [3], [4]).

2) $\varphi > 180$ degrés

Dès que l'onde dans le milieu inférieur atteint le point B, le front d'onde HB dans la couche supérieure a été généré. Si le front HB heurte le segment S2, il crée également un front d'onde A dans le milieu inférieur pour autant que la loi de Snell le permette.

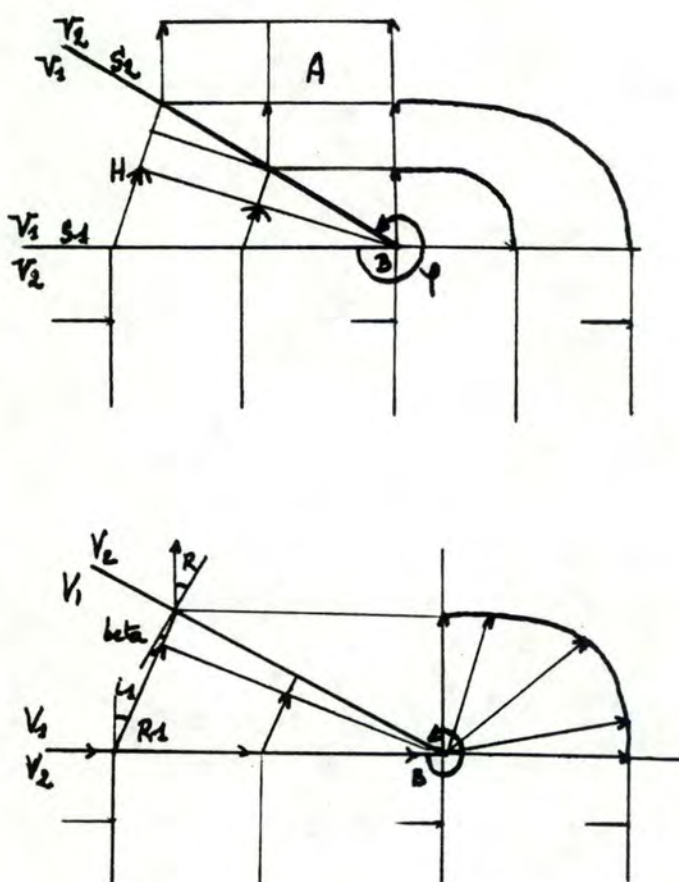
Dans ce cas, une zone de diffraction apparaît permettant le raccord entre ce front d'onde et l'onde de diffraction poursuivant son chemin en ligne droite (**fig.14**). Sinon, une zone de

diffraction se crée entre l'onde initiale et le segment S2 (fig.15).

La propagation des ondes sphériques sur le segment S2 donne naissance à un front d'onde dans le milieu supérieur. On assiste à la pénétration de deux fronts. La zone de diffraction joignant ces fronts se réduit à une ligne. Si la rencontre n'a pas lieu, une zone de diffraction dans la couche V_1 apparaît joignant les deux fronts.

Considérons le problème en utilisant la notion de rayons sismiques.

Le rayon critiquelement réfracté le long de S1 engendre des rayons réfractés R1 dans l'interface supérieure, l'angle de réfraction étant égal à :



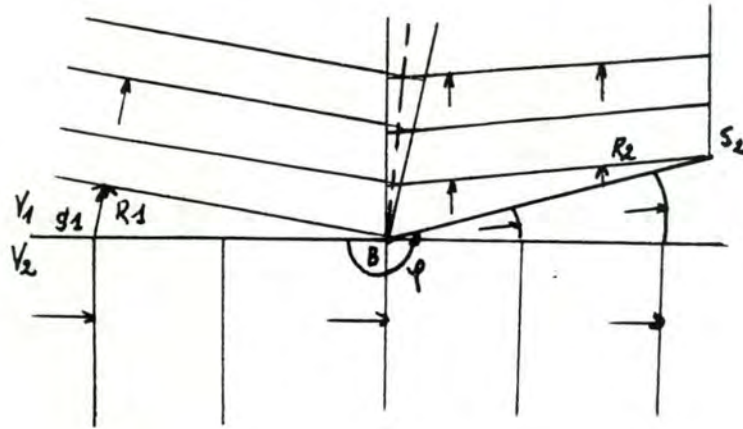


Figure 14 et 15. Représentation de l'interaction d'une onde principale et d'un point double ($\varphi > 180$ degrés)

$$i_1 = \text{ArcSin}(V_1 / V_2) = \text{angle d'incidence critique.}$$

Les rayons interagiront avec le segment S2 si la condition suivante est respectée :

$$\text{Condition : } (90 - i_1) < (\varphi - 180) \quad (1)$$

(angles en degrés)

Dans ce cas, l'angle d'incidence des rayons par rapport à la verticale du segment S2 doit vérifier la loi de Snell, soit :

$$\begin{aligned} D &= \varphi - 270 \\ \text{beta} &= 90 - i_1 - D \\ AL &= \text{ArcSin}(V_1 / V_2) = \text{angle d'incidence critique} = i_1 \\ | \text{beta} | &\leq AL \end{aligned} \quad (2)$$

La progression s'effectuant d'un milieu de vitesse V_1 vers une couche de vitesse V_2 avec $V_1 < V_2$, les rayons ne traverseront l'interface que si la condition (2) est respectée.

Si tel est le cas, une zone de diffraction joignant les deux fronts d'onde est créée. L'ouverture angulaire vaut :

$$\begin{aligned} \text{Limit 1 : } &\varphi - 90 + R \\ \text{Limit 2 : } &180 \end{aligned} \quad (\text{degrés})$$

où $R = \text{ArcSin}(V_1 / V_2 \times \sin(\beta)) = \text{angle de réfraction.}$

Si Limit 1 est inférieure ou égale à Limit 2, la zone se réduit à une ligne identifiée dans le repère par la valeur angulaire :

$$(\text{Limit 1} + \text{Limit 2}) / 2 = \text{Limit}$$

La négation de la condition (2) ou (1) conduit à la même situation. En effet, une zone de diffraction dans la couche inférieure est créée et a pour limite l'onde incidente et l'obstacle solide rencontré (S2) :

Limit 1 : φ

Limit 2 : 180

Les rayons issus de cette zone, longeant S2, provoquent la naissance de rayons réfractés R_2 dans le milieu supérieur; l'angle de réfraction étant égal à i_1 . La rencontre des fronts d'onde associés aux rayons forme une zone de diffraction réduite à une droite identifiée dans le repère par l'angle :

$$\text{Limit} : (A + B) / 2$$

ou $A : 270 - i_1$

$$B : \varphi + 90 - i_1 \quad (\text{degrés}).$$

Si l'intersection des fronts ne se produit pas, une zone de diffraction est créée dans le milieu V_1 :

Limit 1 : B

Limit 2 : B

1.4.5.3 Les points triples

Un point triple est créé par la rencontre de deux interfaces. Si les interfaces sont représentées par une suite de segments, un point triple (P.T.) est une extrémité commune à trois

segments (fig.16).

Les hypothèses établies lors de l'analyse des points doubles sont maintenues :

- le segment supportant le rayon strictement réfracté est horizontal;
- les deux autres segments sont identifiés par une valeur angulaire (ang 1 et ang 2) exprimée en degrés par rapport à l'horizontale. L'angle est mesuré en considérant un sens antihorlogique si le rayon strictement réfracté se propage vers la droite, horlogique si non (repère zonal). Par convention, ang 1 sera toujours strictement inférieur à ang 2;
- la présence d'un rayon critique ment réfracté longeant le segment S1 impose, par la loi de Snell, que : $V_1 < V_2$;
- les problèmes sont traités en considérant les fronts d'onde et les rayons sismiques.

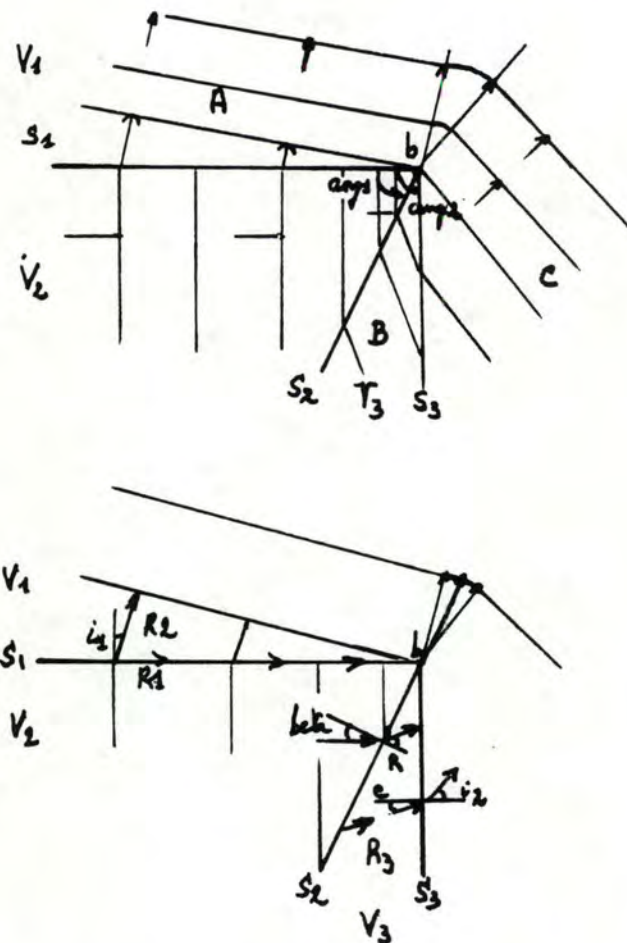


Figure 16 . Interaction avec un point triple (ang 1 et ang 2 < 180 degrés)

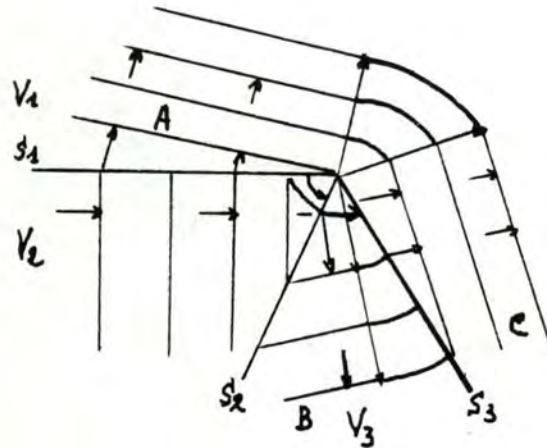


Figure 17 . Interaction avec un point triple (ang 1 et ang 2 < 180°)

Trois cas sont envisageables :

1) ang 1 et ang 2 < 180° (fig.16 et 17)

Première possibilité (fig.16)

Considérons la propagation d'une onde principale dans le milieu V_2 . Cette onde génère un front d'onde A dans la couche supérieure V_1 (**situation zéro**). De plus, elle interagit avec S_2 . Si les conditions de Snell sont vérifiées, la rencontre provoque la création d'un front B dans le milieu V_3 .

L'interaction possible de ce nouveau front avec S_3 ainsi que le respect des conditions de Snell font qu'un autre front C se propageant dans la couche supérieure V_1 est créé. Si ce front rencontre celui généré par l'onde principale (A), une droite d'intersection issue du point b (P.T.) marque la limite de la rencontre. Dans le cas inverse, une zone de diffraction permettant la jonction des deux fronts A et C est réalisée dans le milieu V_1 . Les deux possibilités caractérisent la **situation un**.

Le non-respect des conditions de Snell lors de l'interaction avec le segment S_3 conduit à la situation zéro.

Deuxième possibilité (fig.17)

Le front B dans la couche V_3 peut ne pas rencontrer S3. Une zone de diffraction est alors créée joignant ce front au segment. Les rayons qui en sont issus longeant S3 peuvent donner naissance à un front d'onde dans le milieu supérieur conduisant ainsi à la situation Un. Sinon, la situation zéro persiste.

La violation des conditions de Snell lors de la rencontre entre l'onde principale et S2 conduit à la situation zéro.

Examinons ce problème complexe à l'aide de rayons sismiques.

Le rayon critiquelement réfracté R1 génère un ensemble de rayons réfractés R2 dans le milieu supérieur. L'angle de réfraction vaut : $i_1 = \text{ArcSin}(V_1 / V_2)$ (situation zéro). De plus, le rayon critique interagit avec S2. Si $V_2 < V_3$, la loi de Snell indique que l'angle d'incidence du rayon par rapport à la verticale au segment doit être inférieur ou égal à l'angle critique, soit :

$$\begin{aligned} \text{beta} & : 90 - \text{ang } 1 \\ A_2 & : \text{ArcSin}(V_2 / V_3) = \text{angle critique} \\ \text{condition} & : |\text{beta}| \leq AL \end{aligned} \quad (1).$$

Le respect de la condition (1) entraîne la création d'un rayon réfracté R3. L'angle de réfraction vaut : $R = \text{ArcSin}(V_3 / V_2 \times \sin(\text{beta}))$. Ce résultat est calculé immédiatement si $V_2 > V_3$ conformément à la loi de Snell. Le rayon R3 rencontre S3 si :

$$\text{ang } 2 \leq \text{ang } 1 + 90 - R \quad (2).$$

Dans ce cas, l'angle d'incidence du rayon R3 doit être inférieur à l'angle critique, soit :

$$\begin{aligned} C & = \text{ang } 2 - \text{ang } 1 + R \\ AL & = \text{ArcSin}(V_3 / V_1) \\ \text{condition} & : |c| \leq AL \end{aligned} \quad (3).$$

Par contre, si $V_3 > V_1$, la loi de Snell est toujours vérifiée.

L'angle de réfraction du rayon R4 vaut : $i_2 = \text{ArcSin}(V_1 / V_3 \times \sin(2))$.

Dans le milieu V_1 , ce nouveau rayon peut rencontrer les rayons R1 si :

$$\begin{aligned} D &= \text{ang } 2 + (90 - i_2) \\ (270 - i_1) &< D \end{aligned} \quad (4).$$

Le respect de la condition (4) impose la création d'un rayon résultant de cette interaction identifiée par l'angle : $(270 - V_1 + D) / 2$. Sinon, une zone de diffraction voit le jour afin de joindre les différents fronts liés aux rayons sismiques. Les limites de cette zone sont :

Limit 1 : $270 - i_1$

Limit 2 : D.

Ce traitement caractérise la **situation Un**.

La violation de la condition (3) conduit à la situation zéro.

La négation de la condition (2) entraîne la création d'une zone de diffraction dans la couche V_3 dont les limites sont :

Limit 1 : $\text{ang } 2$

Limit 2 : $\text{ang } 1 + 90 - R$.

Les rayons issus de cette zone longeant S3 peuvent créer des rayons réfractés dans le milieu supérieur si $V_3 > V_1$ (5).

Dans ce cas, l'angle de réfraction vaut : $i_2 = \text{ArcSin}(V_1 / V_3)$. La rencontre de rayons dans le milieu supérieur est possible si la condition (4) est vérifiée. Le traitement découlant de la confirmation ou de l'infirmité de cette condition est identique à celui conduisant à la situation Un.

Le non-respect de la condition (5) conduit à la situation zéro. Enfin, la violation de la première condition mène également à la situation zéro.

2) $\text{ang } 1 < 180$ et $\text{ang } 2 \geq 180^\circ$ (fig.18 et 19)

Première possibilité (fig.18)

Un front d'onde A est créé dans la couche V_1 suite à l'interaction de l'onde principale et du segment S1 dans le milieu V_2 (**situation zéro**).

La rencontre possible de ce front et de S3 peut générer un front B dans le milieu V_3 pour autant que les conditions de Snell soient respectées (**situation Un**). L'onde principale interagit avec S2. La loi de Snell permet la création d'un front d'onde C se propageant dans la couche V_3 si certaines conditions sont respectées (**situation Deux**). La rencontre des fronts B et C est marquée par une droite issue du P.T. (marqué b). Dans le cas inverse, une zone de diffraction joignant les fronts apparaît. Ces deux éventualités caractérisent la **situation Trois**.

L'absence possible de front C conduit à la situation Un.

Deuxième possibilité (fig.19)

Supposons que la situation Un ne puisse se réaliser, mais que le front C existe dans la couche V_3 (situation deux). Une zone de diffraction joignant le front à S3 est créée si ce front ne peut atteindre le segment (**situation Quatre**).

La rencontre entre le front C ou la zone et S3 peut engendrer un front d'onde D se propageant dans le milieu supérieur (**situation Cinq**). Une droite d'intersection ou une zone de diffraction apparaît en fonction des positions des fronts A et D (**situation Six**).

La loi de Snell peut empêcher la création du front D. Dans ce cas, les situations zéro et Quatre subsistent.

Troisième possibilité

La négation de la situation Un et Deux fait que seul subsiste le front d'onde A dans le milieu supérieur et l'onde principale lui ayant donné naissance situé dans la couche V_2 .

Utilisons les rayons sismiques pour analyser ces situations.

Première alternative

Le rayon critiquelement réfracté dans la couche V_2 génère des rayons réfractés $R1$ dans la couche supérieure. L'angle de réfraction vaut : $i_1 = \text{ArcSin}(V_1 / V_2)$ (situation zéro).

Les rayons $R1$ peuvent entrer en contact avec $S1$ et créer des rayons réfractés $R2$ si :

$$\text{Test} = 90 - i_1 - D$$

$$AL = \text{ArcSin}(V_1 / V_3)$$

$$\text{Si } V_1 < V_3 \quad \text{condition} \quad |\text{test}| \leq AL \quad (1)$$

sinon condition toujours vraie.

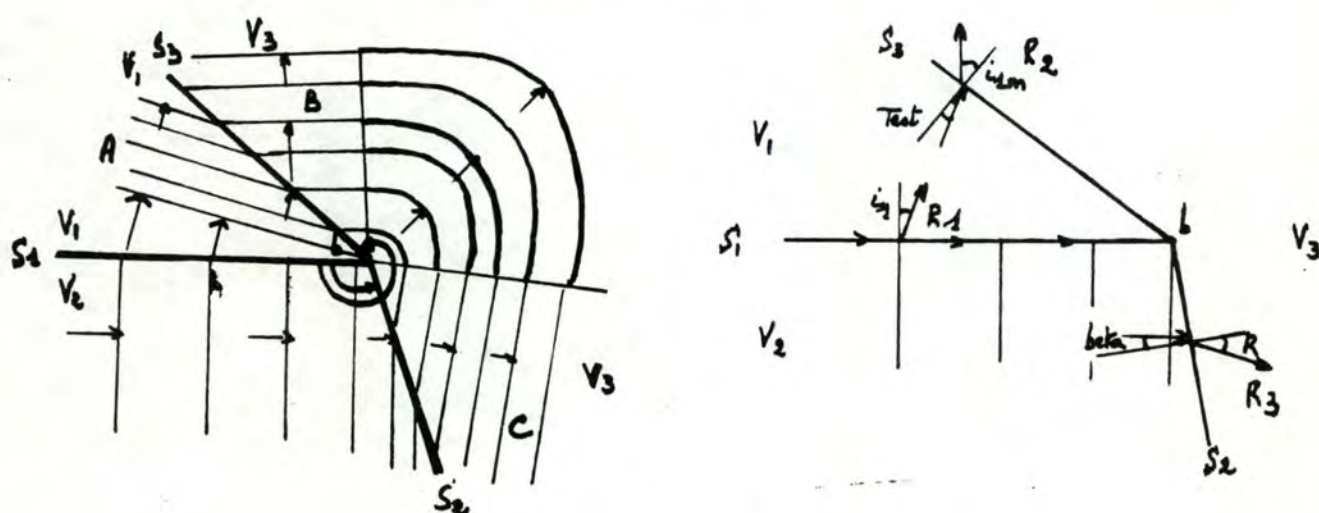


Figure 18 . Interaction avec un point triple (ang 1 < 180 et ang 2 ≥ 180°)

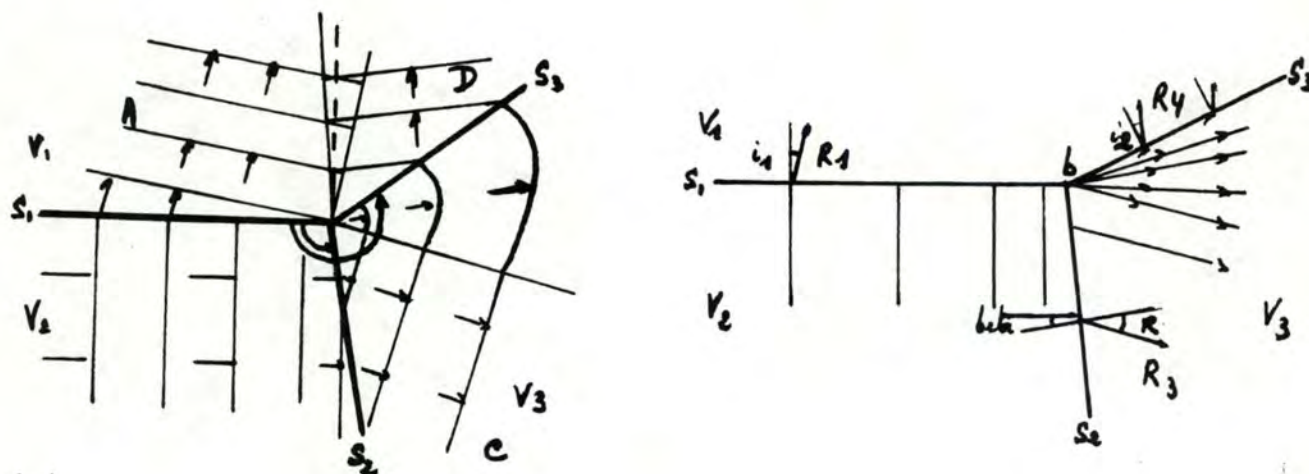


Figure 19 . Interaction avec un point triple (ang 1 < 180 et ang 2 ≥ 180°)

L'angle de réfraction vaut $i_{1m} = \text{ArcSin}(V_3 / V_1 \times \sin(\text{test}))$ (**situation Un**).

Les rayons critiques interagissent avec S2. Ils créent des rayons réfractés R3 dans le milieu V_3 si :

$$\beta = 90 - \text{ang } 1$$

$$\text{si } V_2 < V_3$$

$$AL = \text{ArcSin}(V_2 / V_3)$$

$$\text{condition} \quad |\beta| \leq AL \quad (2)$$

$$\text{sinon} \quad \text{condition toujours vraie.}$$

L'angle de réfraction vaut $R = \text{ArcSin}(V_3 / V_2 \times \sin(\beta))$ (**situation Deux**).

La rencontre possible des rayons R3 et R2 dans le milieu V_3 forme un rayon d'intersection identifié par l'angle :

$$A = \text{ang } 2 - (90 - i_{1m})$$

$$B = \text{ang } 1 + (90 - R)$$

$$\text{Limit} = (A + B) / 2.$$

Une zone de diffraction est créée si l'intersection n'intervient pas. Les limites en sont :

$$\text{Limit } 1 = A$$

$$\text{Limit } 2 = B \text{ (situation Trois).}$$

Deuxième alternative

La négation de la condition (2) peut engendrer une autre situation. Considérons les rayons R3 dans le milieu V_3 . Si ces rayons heurtent le segment S3, des rayons réfractés R4 peuvent être générés dans la couche supérieure, soit :

$$C : \text{ang } 2 - \text{ang } 1 + R$$

$$\text{Si } V_3 < V_1 : AL = \text{ArcSin}(V_3 / V_1) = \text{angle critique}$$

$$\text{condition } |C| \leq AL \quad (3)$$

sinon condition toujours vraie.

L'angle de réfraction vaut $i_2 = \text{ArcSin}(V_1 / V_3 \times \sin(C))$ (situation Quatre).

Une intersection des rayons R4 et R1 est possible. L'angle du rayon résultant vaut :

soit $D : \text{ang } 2 + (90 - i_2)$

angle : $(270 - i_1 + D) / 2$ (situation Cinq).

Autrement, une zone de diffraction voit le jour :

Limit 1 : $270 - i_1$

Limit 2 : $\text{ang } 2 + (90 - i_2)$ (situation Six).

La rencontre des rayons R3 et du segment S3 peut s'avérer impossible. Dans ce cas, une zone de diffraction dans le milieu V_3 est créée. Les rayons issus de cette zone longeant S3 peuvent également générer des rayons réfractés R4 si $V_3 > V_1$ (4).

L'angle de réfraction vaut alors : $i_2 = \text{ArcSin}(V_1 / V_3)$.

Les phénomènes de création d'un rayon d'intersection ou de zone de diffraction dans le milieu supérieur sont possibles. Les calculs sont effectués avec la valeur i_2 présentée ci-dessus.

La violation des conditions (3) et (4) conduit aux situations zéro et Quatre.

Troisième alternative

La négation des conditions (1) et (2) fait que seuls subsistent les rayons R1 et les rayons critiqueusement réfractés les ayant créés.

3) ang 1 \geq 180 et ang 2 $>$ 180 (fig. 20, 21, 22)

Première possibilité (fig.20)

Une onde principale se propage dans le milieu V_2 . Par son interaction avec S1, elle crée un front A dans la couche supérieure V_1 (situation zéro). Ce front peut rencontrer le

segment S_3 et générer un front B dans le milieu V_3 si la loi de Snell le permet (**situation Un**).

De nouveau, l'interaction possible du front B et du segment S_3 peut donner naissance à un troisième front C se propageant dans le milieu V_2 (**situation Deux**). Si ce front rencontre l'onde principale, une droite d'intersection issue du P.T. (b) délimite la zone de rencontre.

Dans le cas inverse, une zone de diffraction permettant la rencontre des deux fronts voit le jour (**situation Trois**).

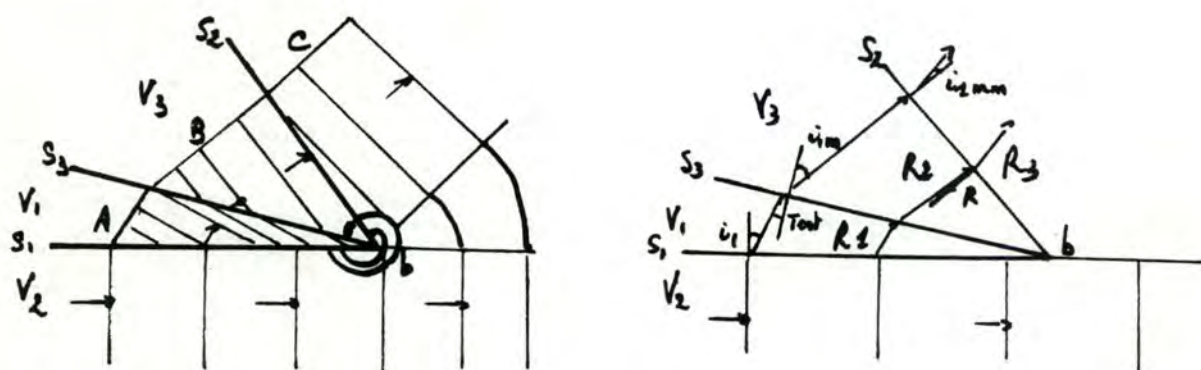


Figure 20 . Interaction avec un point triple (ang 1 ≥ 180 et ang 2 > 180 degrés)

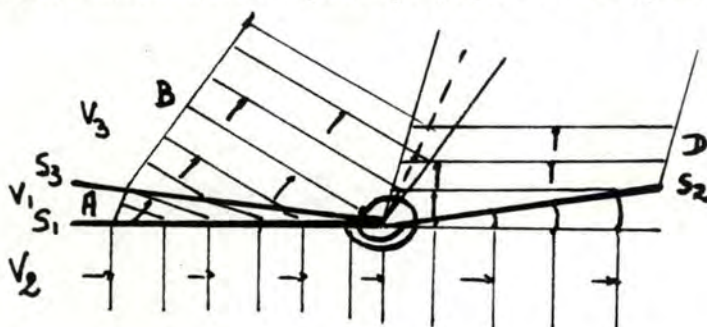


Figure 21 . Interaction avec un point triple (ang 1 ≥ 180 et ang 2 > 180 degrés)

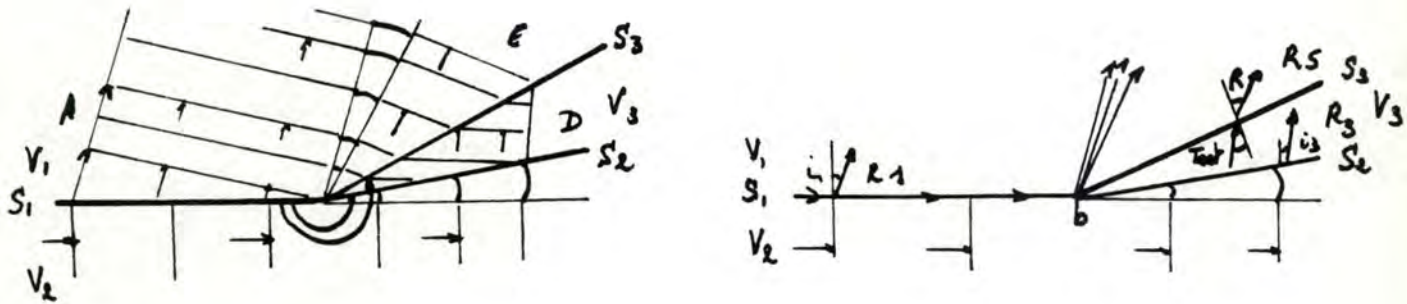


Figure 22 . Interaction avec un point triple ($\text{ang } 1 \geq 180$ et $\text{ang } 2 > 180$ degrés)

Deuxième possibilité (fig.21)

L'impossibilité de créer le front C (situation Deux) conduit à un autre scénario. Par effet de bord, une zone de diffraction entre l'onde principale et S2 est créée (**situation Quatre**) pour autant que $\text{ang } 1 > 180^\circ$. L'interaction entre la zone où l'onde principale et S2 ainsi que le respect de la loi de Snell provoque la naissance d'un front D se propageant dans le milieu V_3 (**situation Cinq**). Une droite d'intersection issue de b fixe la rencontre probable des fronts B et D. Sinon, une zone de diffraction permettant leur raccord est générée (**situation Six**). Les situations Quatre et Un subsistent si le front D ne peut être créé.

Troisième possibilité (fig. 21)

La violation des conditions de Snell peut empêcher la création du front d'onde B (situation Un). Les situations Quatre et Cinq sont considérées. La loi de Snell refusant la réalisation de la situation Cinq conduit aux situations résultantes Quatre et zéro. Par contre, si le front D subsiste dans le milieu V_3 , il peut rencontrer S3. Une zone de diffraction joignant le front D au segment est créée si l'intersection est impossible (**situation Sept**). Dans les deux cas, le front d'onde E se propageant dans la couche V_1 peut voir le jour (**situation Huit**). Une rencontre des fronts A et E crée une droite d'intersection ou une zone de diffraction (**situation Neuf**).

La création de ce dernier front E peut être empêchée par la loi de Snell. Dès lors, les situations zéro, Quatre et Sept subsistent.

Considérons le problème à l'aide de rayons sismiques :

Première alternative

Le rayon critiquelement réfracté dans le milieu V_2 engendre des rayons réfractés R1 dans la couche supérieure.

L'angle de réfraction vaut : $i_1 = \text{ArcSin}(V_1 / V_2)$ (**situation Zéro**).

La rencontre entre les rayons critiques et S3 crée de nouveaux rayons réfractés R2. La condition pour qu'un tel phénomène se déroule est :

soit $D = \text{ang } 2 - 270$

Test = $90 - i_1 - D$

Si $V_1 < V_3$: $AL = \text{ArcSin}(V_1 / V_3) = \text{angle critique}$

condition : $|\text{test}| \leq AL$ (1)

sinon condition toujours vraie.

L'angle de réfraction vaut : $i_m = \text{ArcSin}(V_3 / V_2 \times \sin(\text{test}))$ (**situation Un**).

Ces rayons R2 peuvent interagir avec S2 et donner naissance aux rayons R3 si :

$R = i_{1m} + (\text{ang } 2 - \text{ang } 1)$

Si $V_3 < V_2$: $AL = \text{ArcSin}(V_3 / V_2)$

condition $|R| \leq AL$ (2)

sinon condition toujours vraie.

L'angle de réfraction vaut : $i_{1mm} = \text{ArcSin}(V_2 / V_3 \times \sin(R))$ (**situation Deux**).

La rencontre des rayons R3 et des rayons R1 fournit un rayon résultant identifié par la valeur angulaire : $(\text{ang } 1 - (90 - i_{1mm}) + 180) / 2$.

Une zone de diffraction apparaît si l'intersection ne se produit pas. Les limites sont :

Limit 2 : 180

Limit 1 : $\text{ang } 1 - (90 - i_{1mm})$ (**situation Trois**).

Deuxième alternative

Le non-respect de la condition (2) provoque la création, par effet de bord, d'une zone de diffraction dans le milieu V_2 , pour autant que $\text{ang } 1 > 180$. Les limites en sont :

Limit 1 : $\text{ang } 1$

Limit 2 : 180 (**situation Quatre**).

Les rayons issus de cette zone, longeant le segment S2, génèrent les rayons réfractés R4 dans le milieu V_3 , si $V_3 < V_2$.

L'angle de réfraction vaut : $AL = \text{ArcSin}(V_3 / V_2)$ (**situation Cinq**).

Une zone de diffraction ou une droite d'intersection peuvent être créées en fonction des positions des rayons R4 et R2.

Pour la zone, les limites sont :

Limit 1 : $\text{ang } 2 - (90 - i_m)$

Limit 2 : $\text{ang } 1 + (90 - AL)$.

La droite est identifiée par : $(\text{Limit } 1 + \text{Limit } 2) / 2$ (**situation Six**).

Troisième alternative

La violation de la condition (1) permet de considérer les situations Quatre et Cinq. Si la condition (2) est également fausse, les situations Zéro et Quatre subsistent. Si (2) est évaluée à vrai, les rayons R3 progressent dans la couche V_3 . La rencontre avec S3 permet la création de rayons R5 si :

$$i_3 = \text{ArcSin}(V_3 / V_2)$$

$$\text{Test} = i_3 + (\text{ang } 2 - \text{ang } 1)$$

$$\text{Si } V_3 < V_1 : AL = \text{ArcSin}(V_3 / V_1)$$

$$\text{condition : Test} \leq AL \quad (3)$$

sinon condition toujours vraie.

L'angle de réfraction vaut : $R = \text{ArcSin}(V_1 / V_3 \times \sin(\text{test}))$. L'intersection des rayons R5 et R1 forme un rayon identifié par l'angle :

$$\text{soit } D = \text{ang } 2 + (90 - R)$$

$$\text{Limit} = ((270 - U_1) + D) / 2 \quad (\text{situation Neuf}).$$

Une zone de diffraction est créée, sinon :

$$\text{Limit } 1 = 270 - i_1$$

$$\text{Limit } 2 = \text{ang } 2 + (90 - R).$$

L'impossibilité d'une rencontre entre les rayons R3 et S3 entraîne la création d'une zone de diffraction dans le milieu V_3 :

$$\text{Limit } 1 = \text{ang } 2$$

$$\text{Limit } 2 = \text{ang } 1 + (90 - i_3) \quad (\text{situation Sept}).$$

Des rayons issus de cette zone, longeant S3, génèrent des rayons réfractés si $V_3 < V_1$.

L'angle de réfraction vaut : $AL = \text{ArcSin}(V_1 / V_3)$. De ce fait, la situation précédente est valable en considérant le calcul avec cet angle (**situation Huit**).

Si la condition (3) n'est pas respectée, les situations Zéro, Quatre et Sept subsistent.

Remarques générales

1. La théorie des points spéciaux respecte les situations de la référence [3] représentées aux figures 23 et 24 . Ces exemples considèrent les configurations géologiques les plus courantes.
2. Il est évident que certains fronts d'onde sont plus énergétiques que d'autres. En effet, si la figure 22 est considérée, le front A provoqué par l'interaction de l'onde principale et du segment S1 est plus énergétique que le front E généré par la rencontre d'une onde de permutation D et du segment S3.

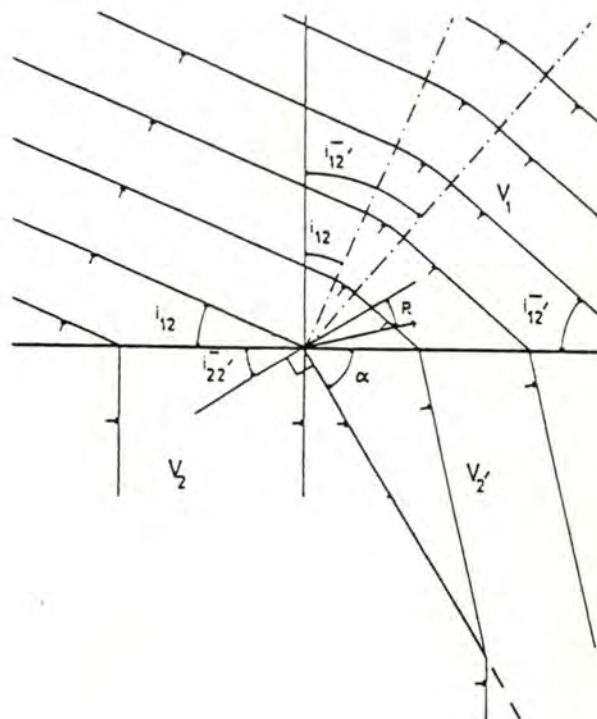
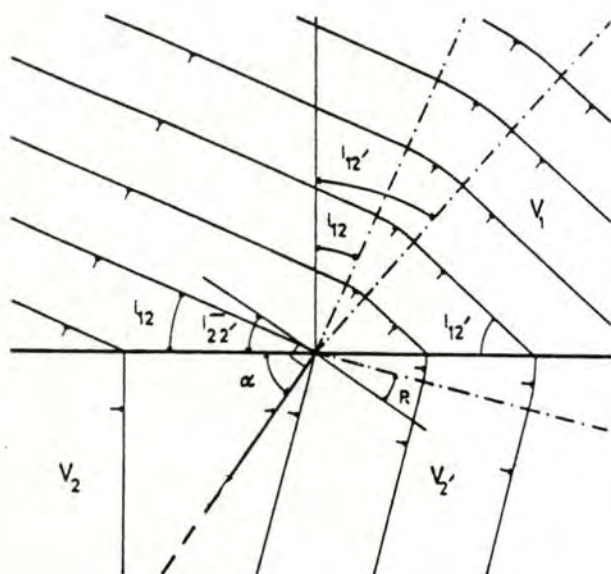


Figure 23. Interaction avec un point triple ($V_1 < V_2' < V_2$). L'onde principale se propage dans le milieu V_2 (ang 1 < 180, ang 2 = 180 degrés)(réf. [3])

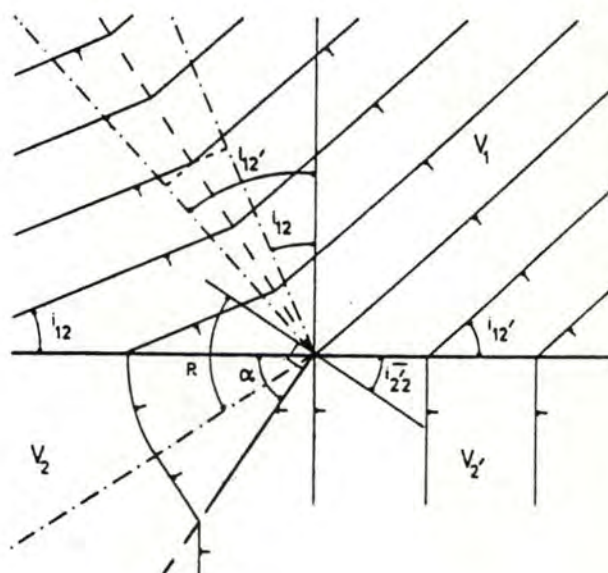
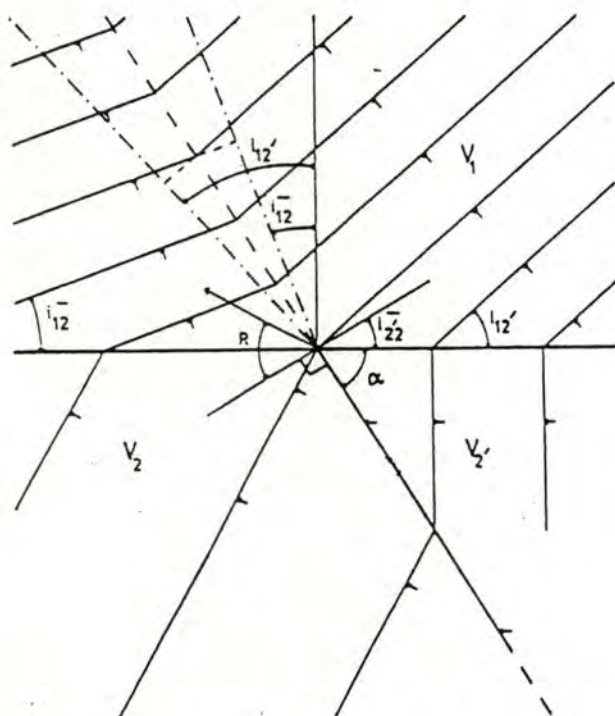


Figure 24 . Interaction avec un point triple ($V_1 < V_2' < V_2$). L'onde principale se propage dans le milieu V_2' (ang 1 < 180, ang 2 = 180 degrés)(réf. [3])

Chapitre 2

LA PHILOSOPHIE "MACINTOSHIE"NE"

La réalisation du logiciel de réfraction sismique a été effectuée en Turbo-Pascal sur un micro-ordinateur Macintosh-Plus.

Précédant la présentation de l'application, une brève discription des caractéristiques de la machine est indispensable. De plus, de par leur influence sur la programmation et sur la conception de l'architecture du logiciel, les quatre concepts constituant la philosophie du Macintosh sont étudiés.

2.1 PRINCIPES GENERAUX (réf. [7], [8])

Le coeur du Macintosh est constitué d'un microprocesseur 32 bits Motorola MC68000 cadencé par une horloge à 8 MHZ.

La mémoire RAM atteint un Mégaoctet et la mémoire ROM, 128 Koctets. La ROM contient le système d'exploitation (O.S.) réalisant l'interface avec le matériel (hardware) et les tâches de base telles que la gestion des interruptions, l'organisation de la mémoire et les entrées/sorites. De plus, elle contient une boîte à outils ou **ToolBox** offrant un peu plus de six cents procédures et fonctions. L'emploi des composants du ToolBox assure la cohérence des applications entre elles et diminue sensiblement la taille du code généré ainsi que son temps de développement.

Néanmoins, certaines parties du système d'exploitation et du ToolBox ne sont pas en ROM, mais stockées sur disquette dans le fichier "System". Il s'agit, par exemple, des routines de calcul aux normes IEEE et des routines d'impression. Ceci permet de pouvoir facilement les modifier ultérieurement afin de les adapter à de nouvelles normes ou d'autres imprimantes, ...

La réalisation d'un logiciel sur Macintosh impose au programmeur l'emploi des routines offertes par la ROM. Un programme n'y accédera qu'au travers d'une table d'aiguillage ("Trap dispatch table") se trouvant en mémoire vive afin, principalement, d'assurer la compatibilité avec les versions futures du système. La position des diverses routines de la ROM est contenue, sous une forme codée et compactée, dans la ROM elle-même. Lors du démarrage du système, ces informations sont décodées pour construire la table d'aiguillage en RAM.

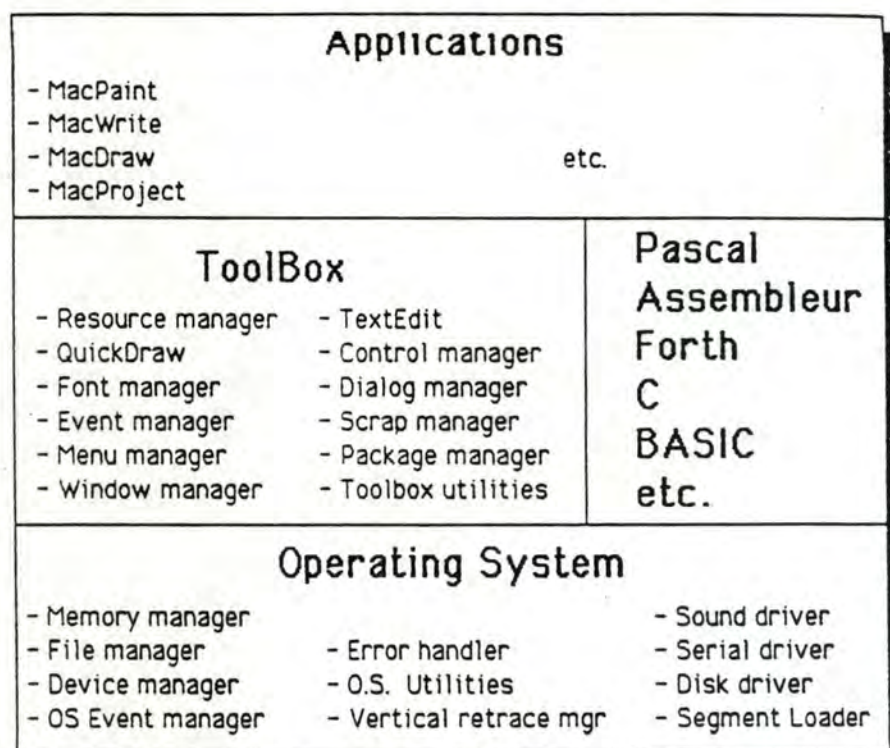
Bien que le format d'une adresse dans Macintosh soit un mot long (32 bits), les adresses de la table d'aiguillage sont écrites, dans un but de compacité, sur des mots de 16 bits.

Dans un programme d'application, l'accès aux routines via la table est réalisé par une interruption logicielle particulière dite "ligne 1010". En effet, le microprocesseur MC68000 reconnaît un certain nombre d'instructions machine constituées d'au moins un mot de 16 bits que l'on appelle code-opération (Opcode). Une instruction commençant par "\$A" (1010 en binaire) appelée **"trappe logicielle"** ne correspond à aucun opcode valide du 68000 et est considérée comme une instruction "non implémentée". Elle provoque donc une interruption logicielle.

Ce mécanisme a pour but de permettre aux concepteurs de systèmes d'augmenter le jeu d'instructions de ce microprocesseur avec du code externe simplement accessible.

Pour utiliser une telle démarche depuis son programme, le développeur utilise une des macro-instructions définies dans les fichiers constituant l'environnement de développement. Cette macro génère une trappe logicielle définissant la routine évoquée et contenant certaines informations complémentaires, notamment la partie de la ROM où se trouve la routine évoquée (système d'exploitation ou ToolBox) ainsi que le numéro de trappe servant d'index dans la table d'aiguillage.

Un schéma des couches logicielles du Macintosh regroupant les caractéristiques du microprocesseur, les routines de l'O.S. et du ToolBox ainsi que quelques applications standards est présenté ci-dessous (fig.23).



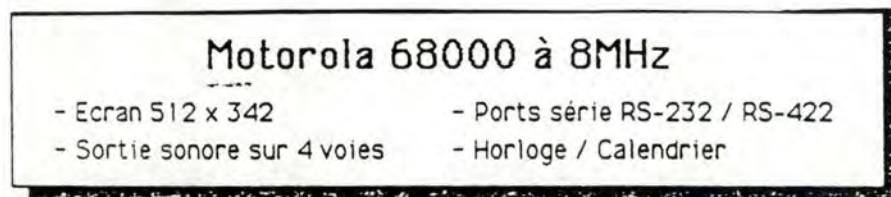


Figure 23 . Schéma des couches logicielles du Macintosh (réf. [8])

2.2 CONCEPTS IMPORTANTS (réf. [5], [6])

2.2.1 L'ECRAN GRAPHIQUE (Graphes Only Display)

Pour la présentation d'informations, bon nombre d'ordinateurs proposent l'utilisation d'un écran graphique ou textuel.

En employant un Macintosh, tous les renseignements visualisés, textes ou dessins, sont considérés comme graphiques.

L'écran est en fait un "**bit-map**" constitué de 342 lignes contenant chacune 512 pixels (ou points). Le terme "bit-map" provient du fait que chaque point correspond à un bit (0 ou 1) en mémoire RAM. Les 175104 pixels constituant l'écran peuvent donc être alternativement blancs ou noirs.

Un Byte comprenant huit bits, un écran occupe près de 21 KBytes en mémoire. En modifiant la valeur d'un Byte, on peut changer le contenu d'un écran.

La manipulation d'un "bit-map" peut être complexe. Par exemple, un caractère apparaissant sur écran doit être dessiné point par point. Heureusement, l'utilisation de ces possibilités graphiques est rendue très simple par l'emploi de routines spécialisées de la ROM.

2.2.2 L'INTERFACE D'UTILISATION (Visual User Interface)

L'interface permettant à l'utilisateur d'employer les facilités du Macintosh est basé sur l'utilisation de menus, icônes et fenêtres; une **fenêtre** étant un rectangle pouvant représenter une feuille de papier sur laquelle l'utilisateur stocke ou visualise de l'information de type texte ou

graphique.

Une souris est également employée pour l'activation ou la manipulation des fichiers représentés par des icônes. De plus, elle permet la sélection d'options figurant dans des menus.

2.2.3 LES ROUTINES DU TOOLBOX ET DE L'O.S.

Les routines sont organisées en groupe appelé **gestionnaire** ou "package" (package). L'utilisation de ces gestionnaires rend possible la création d'interfaces personnalisées, l'enregistrement et la présentation d'informations, le stockage de données ainsi qu'une gestion aisée des événements détectés, ...

Le Macintosh Plus dispose de 23 gestionnaires. Une présentation même succincte de chaque entité serait une tâche fastidieuse. Par conséquent, seuls les aspects les plus importants du ToolBox seront envisagés. Une description plus détaillée des différents gestionnaires peut être trouvée dans les références [5], [6]. Une liste exhaustive est présentée dans la figure 23.

L'un des points les plus importants du ToolBox est la notion de ressources. Par cet intermédiaire, les définitions des menus, icônes, fenêtres ainsi que de certaines chaînes de caractères peuvent être stockées en-dehors du code exécutable.

Le gestionnaire de ressources fournit un ensemble de procédures permettant l'accès, l'identification et la manipulation des ressources. Le "package" graphique "QuickDraw" contient toutes les routines modifiant l'aspect de l'écran. Quand il s'agit d'écrire du texte, QuickDraw fait appel au gestionnaire de jeux de caractères qui, par l'intermédiaire du gestionnaire de ressources, est capable d'utiliser de nombreuses typographies et présentations.

Le coeur du programme Macintosh correspond à l'aiguillage des événements captés par le gestionnaire d'événements. La pression du bouton de la souris, d'une touche du clavier, l'insertion d'une disquette dans un lecteur, sont des événements que le gestionnaire se charge de placer dans une file d'attente que le programme pourra scruter à tous moments (cfr *La programmation événementielle*, cfr ci-dessous).

Un certain nombre de routines concernant la manipulation de bits, d'images, de chaînes de caractères et de calculs en virgule fixe, sont inclus dans les utilitaires du ToolBox.

Toutes les informations qu'une application Macintosh souhaite afficher sont placées dans une fenêtre. Pour ouvrir, déplacer, activer, changer la taille, fermer une fenêtre, le gestionnaire des fenêtres est utilisé. Le gestionnaire des contrôles, comme son nom l'indique, se charge du

fonctionnement correct des contrôles. Un **contrôle** se définit comme un objet graphique avec lequel l'utilisateur, à l'aide de la souris, peut manipuler l'information ou modifier la manière dont celle-ci est présentée. Les barres de défilement, les boutons-radio en sont des exemples (réf. [5]). Un des gestionnaires les plus importants, celui des menus, permet à l'utilisateur d'examiner les choix mis à sa disposition sans obligation d'exécuter la commande. L'utilisateur n'est plus obligé de retenir des commandes ou des combinaisons de touches complexes ou peu naturelles. Enfin, le gestionnaire des dialogues se charge de la maintenance des fenêtres de dialogue et d'alerte, et le gestionnaire de Bureau gère les accessoires de bureau tels que Calculatrice, Bloc-Notes, Tableau de bord disponibles en permanence dans le menu "Pomme".

2.2.4 LA PROGRAMMATION EVENEMENTIELLE (Event-Driver Programming)

2.2.4.1. Introduction

Dans de nombreux logiciels interactifs, le programme attend généralement une commande introduite par l'utilisateur l'obligeant à exécuter une suite précise d'actions. Ces programmes se composent de différents niveaux et modes d'exécution possédant chacun leur propre ensemble de commandes. Ils sont appelés "programmes modaux" par les concepteurs du Macintosh (réf. [6]).

Une commande est elle-même sensible au contexte, c'est-à-dire qu'elle peut conduire à la réalisation d'actions différentes dépendant de l'état ou du mode courant dans lequel se trouve le programme.

Dans une application Macintosh, une commande n'assume qu'un rôle déterminé. Par exemple, les mêmes commandes d'édition sont activées si une fenêtre permettant l'édition de textes a été ouverte par une application ou par un accessoire. Cela correspond cependant à des états différents du logiciel.

De plus, le programme ne réagit pas uniquement aux commandes introduites par l'utilisateur. Il considère également d'autres événements tels que l'action d'une souris ou ceux générés par le système lui-même comme la mise à jour d'une fenêtre. Il en résulte que de nombreuses applications différentes possèdent néanmoins une partie de code commune relative à la gestion de ces événements. Cette caractéristique n'est pas l'appanage des programmes "modaux".

2.4.2 GESTION DES EVENEMENTS

La possibilité de détecter et gérer des événements autres que l'action de l'utilisateur sur une touche du clavier influence le programmeur à considérer la programmation événementielle comme un moyen efficace pour structurer et réaliser son logiciel. Le programme de prospection sismique mis au point se base sur les différents conseils promulgués par les concepteurs du Macintosh, repris ci-dessous (réf. [5], [6]).

Le corps principal d'un grand nombre d'applications réalisées en Pascal sur Macintosh est pratiquement identique. Il peut se schématiser comme suit (réf. [6]):

```

begin
  Initialize
  Repeat
    System Task
    If GetNextEvent (even Mask, theEvent) then
      HandleEvent
  Until Done;
end.
```

L'initialisation du programme est effectuée à l'aide d'une procédure 'Initialize' écrite par l'utilisateur. Son but consiste, entre autre, à mettre en place un menu, une fenêtre de présentation ainsi de réaliser certaines initialisations spécifiques à l'application.

Ensuite, une boucle est exécutée se terminant dès que le boolean 'Done' est vrai. Ceci survient dès que l'utilisateur choisit l'option "Quit" dans le menu. Cette boucle réalise deux tâches importantes :

- > La routine SystemTask du ToolBox est appelée. Elle permet la mise à jour par l'O.S. de l'ensemble des accessoires pouvant être utilisés.
- > Une autre routine du ToolBox, GetNextEvent, est activée afin de détecter la survenance d'un événement.

La procédure HandleEvent conçue par l'utilisateur prend en charge l'événement dès que la fonction renvoie la valeur "Vrai".

La structure de la procédure HandleEvent est également standard à toute application. Elle peut se représenter comme suit :

Procedure HandleEvent (the Event : EventRecord) (réf. [6])

begin

Case theEvent.What of

 mouseDown : DoMouseDown (theEvent);

 keyDown : DoKeyPress (theEvent);

 updateEvt : DoUpDate (theEvent);

 activateEvt : DoActivate (the Event);

end

end;

L'analyse de la donnée "TheEvent" du type prédéfini "EventRecord" fournie par la fonction "GetNextEvent" permet de préciser la nature de l'événement. Ce paramètre possède la structure suivante :

Type

 EventRecord =

 Record

 What : integer;

 Message : Longint;

 When : Longint;

 Where : Point;

 Modifiers : integer

end;

- What : Ce champ est sans nul doute le plus important. Il identifie l'action de l'utilisation détectée parmi seize événements prédéfinis.
- Message : contient une information spécifique à l'événement enregistré. Par exemple, la

pression d'une touche du clavier provoque l'enregistrement dans ce champ de la valeur ASCII du caractère correspondant.

- When : donne le temps écoulé entre le démarrage du système et l'apparition de l'événement. L'unité de base est le tick équivalent à 1/60ème de seconde. Ce champ peut être utilisé pour la détection de double clic réalisé à l'aide d'une souris.
- Where : fournit les coordonnées globales de la position de la souris sur écran.
- Modifiers : fournit un ensemble d'informations spécifiques.

En fonction du type d'événement enregistré, la procédure HandleEvent active une procédure de gestion dont la structure est de nouveau commune à bon nombre d'applications :

- MouseDown : une pression sur le bouton de la souris a été détectée. La localisation de la position de la souris (champ "Where") sur écran permet la sélection d'un traitement relatif à l'une des six situations standards suivantes :

- InMenuBar : L'utilisateur consulte les options du menu. Le choix d'une option activée engendre l'exécution d'une série d'actions spécifiques au logiciel.
- InContent : La souris est positionnée dans le contenu d'une fenêtre. Un traitement particulier est réalisé si cette fenêtre est active. Sinon, l'activation de cette fenêtre est entreprise.
- InGoAway : La fenêtre est désactivée et disparaît de l'écran.
- InGrow : La taille de la fenêtre est modifiée.
- InDrag : La fenêtre est déplacée.
- InSysWindow : Le système se charge de la gestion de la fenêtre. L'utilisateur a demandé l'activation d'un accessoire du bureau présent dans le menu "Pomme".

- KeyDown : Une touche du clavier a été enfoncée. Cette touche peut être considérée comme une commande spéciale spécifique à l'application, une sélection dans un menu ou un caractère à afficher. Le champ "Modifiers" permet de lever l'ambiguïté.
- UpdateEvt : Une partie de la fenêtre doit être redessinée suite à une modification de taille ou à la disparition d'une fenêtre la recouvrant.
- ActivateEvt : Une fenêtre doit être activée.

Cette liste n'est pas exhaustive. Néanmoins, toute application sérieuse se doit de

présenter ces quatre possibilités dans la procédure de traitement des événements.

La gestion des événements étant uniforme, des programmes concernant des applications distinctes comporteront nécessairement des parties similaires.

A mon avis, cette particularité peut aider l'informaticien lors de la conception, l'analyse ou la maintenance d'un logiciel.

Outre son aspect fonctionnel important, la programmation événementielle peut donc avoir des répercussions positives sur le cycle de vie d'un projet informatique.

2.3 DESAVANTAGES DU TURBO-PASCAL SUR MACINTOSH (réf. [6])

Deux faiblesses du Turbo-Pascal pouvant jouer un rôle important dans l'efficacité et la maintenabilité du logiciel sont révélées.

2.3.1 Pauvreté du nombre de fonctions trigonométriques

Le Turbo-Pascal, version 1.0, de Borland, ne présente que les fonctions trigonométriques élémentaires, à savoir : sin, cos, tg et Arctg.

Par conséquent, si le concepteur désire employer une autre fonction, celle-ci devra être programmée.

Lors du calcul des temps de propagation des rayons, la loi de Snell est souvent utilisée afin de déterminer les angles d'incidence ou de réfraction.

L'obtention du résultat passe par l'utilisation de l'ArcSin.

Le Turbo-Pascal n'offrant point cette fonction, deux méthodes de programmation sont envisageables :

1) La formule suivante donne l'ArcSin en terme de l'Arctg :

$$\text{ArcSin}(x) = \pi/2 - (\text{Arctg}(\sqrt{(1-x)(1+x)}) \times 2) ; x < > -1$$

Trouver une formule permettant ce genre de rapprochement n'est pas toujours évident.

2) Les développements en série entière sont utilisés :

$$\text{ArcSin}(x) = x + \frac{1}{2} \frac{x^3}{3} + \frac{4!}{2^4 (2!)^2} \frac{x^5}{5} + \dots + \frac{(2r)!}{2^r (r!)^2} \frac{x^{2r+1}}{2r+1} + \dots \quad (\text{réf. [9]}).$$

La valeur est fournie dès que la comparaison entre deux suites de $(n+1)$ termes et (n) termes est inférieure à un pas fixé par le programmeur. On limite donc la convergence de la série. Cette méthode est plus naturelle.

En plus d'une perte de temps par le programmeur, le temps d'exécution du logiciel peut s'accroître sensiblement si une fonction de ce type est régulièrement utilisée dans l'application. En effet, un gain de temps au niveau du microprocesseur est toujours réalisé si une procédure quelconque est une trappe logicielle (p.46) plutôt qu'une procédure mise au point pour un programme.

2.3.2 Directive de compilation manquante

Lors de la compilation, la directive (\$1 X) présente dans le programme indique au compilateur la nécessité de charger et de compiler immédiatement le fichier de nom X se trouvant sur le disque courant.

Dans de nombreuses versions du turbo-Pascal disponibles sur des compatibles IBM, un symbole identifiant un lecteur de disque peut figurer dans cette directive. Dans ce cas, le fichier mentionné peut se situer sur n'importe quel support monté. Cette possibilité semble exclue du Turbo-Pascal sur Macintosh. Il en résulte que tous les fichiers mentionnés dans le programme doivent être situés sur un même disque. Cela peut poser certains problèmes si le nombre ainsi que la taille de ces fichiers sont relativement élevés.

Lors de la maintenance du logiciel, il faudra donc porter attention à ce type de problème.

Il est sans nul doute possible, par l'emploi de routines de l'O.S., de porter remède à cette situation. Néanmoins, la solution apportée ne sera pas aussi simple et évidente que l'emploi d'un symbole autorisé par les autres versions.

Chapitre 3

DESCRIPTION DE L'ARCHITECTURE LOGICIELLE

3.1 INTRODUCTION

Trois fonctions de base correspondant aux étapes importantes du logiciel sont indispensables :

- 1) Enregistrement des informations relatives aux résultats expérimentaux et au modèle de terrain :
l'utilisateur introduit les coordonnées des points de dromochroniques résultant des expériences effectuées sur le site de prospection. Suite à une première analyse des résultats, un modèle de terrains susceptible de correspondre à la situation géologique rencontrée est introduit par l'utilisateur à l'écran. Les vitesses caractérisant les différentes couches présentes dans le modèle ainsi que les positions des récepteurs en surface et du point d'ébranlement sont également enregistrées.
- 2) Déclenchement du processus de calcul des trajectoires des rayons :
à partir des données introduites lors de l'activation de la première fonction, le logiciel calcule le temps de propagation d'un ensemble de rayons issus du point d'impact et atteignant les différents géophones via les couches géologiques.
Les phénomènes physiques provenant des déclinaisons des interfaces séparant les milieux (P.D.), d'inversion de couches ainsi que de la rencontre de deux contacts géologiques (P.T.) sont pris en compte afin d'ajuster les trajectoires des rayons (cfr p.72).
L'obtention des temps de parcours crée la dromochronique théorique. Dès lors, l'utilisateur peut confronter la courbe expérimentale et théorique.
- 3) Correction du modèle :
une correction du modèle est effectuée si la confrontation des courbes obtenues lors de la première et deuxième étape ne paraît pas satisfaisante.
Le processus de calcul est réactivé afin d'obtenir une nouvelle dromochronique théorique.
Les deux dernières étapes sont réitérées jusqu'à ce que l'approximation des courbes

théoriques et expérimentales soit jugée acceptable. A ce stade, le modèle de terrains transformé doit correspondre au mieux à la configuration géologique réelle subsistant en profondeur.

3.2 L'ARCHITECTURE LOGICIELLE

3.2.1 Introduction

La conception de la structure du logiciel s'appuie sur la démarche décrite en détail dans un cours de Monsier Axel Van Lamsweerde présentée succinctement dans ce paragraphe (réf. [10]). La conception et l'implémentation d'une application sont facilitées si le système à développer est structuré en différents composants.

Ces composants comprennent des traitements et des structures de données permettant la réalisation des fonctions intermédiaires et principales du logiciel. Ils sont regroupés en niveaux distincts ordonnés; l'ordre permettant de fixer une stratégie de conception des composants ainsi que de minimiser les interrelations possibles entre les niveaux.

L'emploi d'une relation reliant les composants de niveaux distincts aboutit à une hiérarchisation du système constituant la première démarche pour la conception d'une architecture logicielle.

La relation "utilise" sera employée. Elle peut se définir comme suit :

soient deux composants A et B de la structure :

A utilise B si et seulement si la validité de A dépend de la disponibilité d'une version correcte de B. Cela sous-entend que B doit être irréprochable au niveau de la conception et des spécifications.

La hiérarchisation "utilise" ainsi obtenue permet, entre autre, l'élimination de redondances fonctionnelles, c'est-à-dire qu'elle évite que deux composants distincts réalisent sensiblement la même chose. L'identification des composants d'un niveau, l'obtention de spécifications précises pour chaque entité ainsi que l'utilisation d'autres relations conduisent à une modularisation du système constituant la dernière étape pour l'obtention d'une architecture logicielle. Les avantages résultant de cette démarche sont nombreux. Les plus intéressants apparaissent au niveau de la maintenabilité de l'application.

Une modification à apporter au logiciel est parfaitement localisable et indépendante de l'environnement modulaire. Par exemple, si la théorie concernant les points spéciaux s'avère incorrecte ou incomplète, un seul module de l'architecture devra être corrigé sans pour autant

modifier l'entièreté du programme. Chaque module est composé d'un ensemble de primitives (procédures ou fonctions) utilisées par les composants des niveaux supérieurs. Un module peut être considéré comme une boîte noire offrant un ensemble de services connus des utilisateurs, mais ne dévoilant pas les stratégies d'implémentation concernant les différentes primitives proposées. Ces secrets se rapportant à des décisions de conception sont connus uniquement du programmeur chargé de sa réalisation.

La figure 24 ci-dessous représente la découpe modulaire effectuée pour l'application. Chaque module constitue une unité indépendante de compilation.

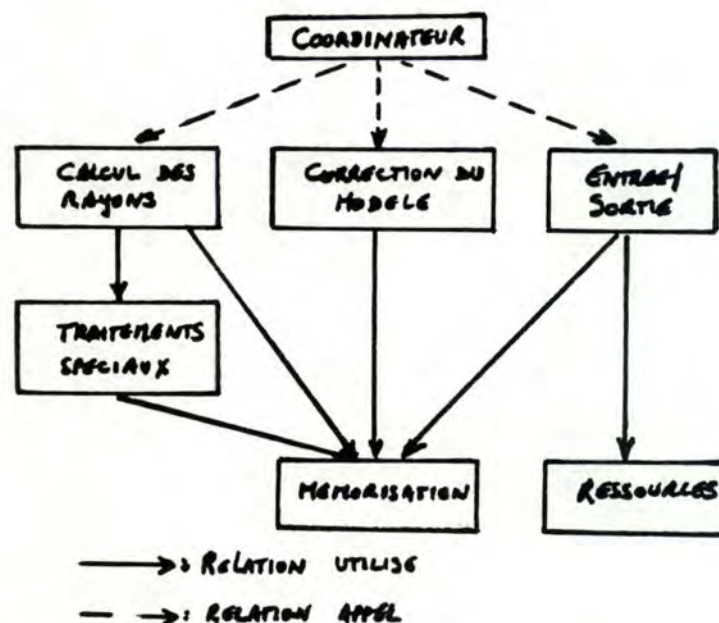


Figure 24 . Architecture logicielle de l'application

3.2.2 Description

Les modules de chaque niveau de l'architecture sont décrits brièvement. L'objectif qu'ils doivent atteindre ainsi que le secret inhérent à chacun d'eux sont dévoilés.

Le niveau "fonction" se compose d'un module coordinateur.

Objectif : Il assure la réalisation des fonctions offertes par le logiciel

Secret : Il connaît le scénario relatif à la réalisation de ces fonctions, c'est-à-dire la série

d'appels aux primitives des niveaux inférieurs permettant l'obtention du résultat souhaité. La boucle événementielle comprenant la gestion des événements est incorporée à ce niveau.

Le niveau "noyau fonctionnel" est constitué de quatre modules répartis en deux (sous-)niveaux :

Premier sous-niveau

Module Entrée/Sortie

Objectif : Il assure l'interface avec l'utilisateur. Les écrans permettant l'enregistrement des données concernant les dromochroniques expérimentales ou le modèle de terrain ainsi que ceux permettant la confrontation des courbes sont générés.

Secret : La réalisation de l'interface.

Module Correction du modèle

Objectif : Les données caractérisant le modèle de terrain sont transformées dans un format susceptible d'être plus facilement utilisables par les autres modules. De plus, des informations introduites par l'utilisateur sont prises en compte pour la modification du modèle.

Secret : Les mécanismes de transformations employés (cfr p.96).

Module Calcul des rayons

Objectif : Obtenir les temps de parcours des rayons via les différentes couches géologiques en fonction des configurations rencontrées.

Secret : Réalisation de la procédure de calcul (cfr p.72).

Deuxième sous-niveau

Module Traitements spéciaux

Objectif : Analyser le comportement d'un rayon interagissant avec un point spécial.

Secret : La théorie relative à la gestion de ce type d'événement (cfr p.29).

Deux modules composent le niveau "Données" :

Module Ressources

Objectif : Fournir l'ensemble des éléments constituant l'interface.

Secret : La définition des fenêtres, icônes, menus et dialogues, c'est-à-dire leur composition et leur emplacement sur écran.

Remarque : Ce module est uniquement employé par le module Entrée/Sortie du niveau supérieur. Les diverses instructions le composant sont rédigées dans une syntaxe propre à la définition des ressources sur Macintosh. De ce fait, un compilateur (RMaker) autre que celui du Turbo-Pascal est employé pour la compilation du module (réf. [6]).

Module Mémorisation

Objectif : Ce module génère les données à manipuler. Il les rend visibles aux modules des niveaux supérieurs.

Secret : Le mode de mémorisation des données ainsi que leur lieu de stockage (mémoire centrale ou auxiliaire).

Outre la présence de ces trois niveaux, l'architecture prend en compte deux niveaux supplémentaires comportant chacun un module : le ToolBox et l'O.S.

Le module comprenant les routines de l'O.S. se situe en bas de l'architecture et est employé, entre autre, par le ToolBox. Ce dernier comprend près de 600 procédures et fonctions pouvant être utilisées par tous les autres modules de l'architecture. Par conséquent, il est situé dans un niveau inférieur à celui des données.

Le but des chapitres suivants consiste à étudier plus en détail les principaux modules de cette architecture.

Chapitre 4

MEMORISATION DES DONNEES

Les informations introduites par l'utilisateur doivent être stockées et structurées afin d'être manipulées correctement par le programme. Pour ce faire, un ensemble de cinq fichiers situés sur une mémoire auxiliaire et de listes chaînées, en mémoire centrale, sont employés. Leur structure interne ainsi que leur utilité sont analysées dans ce chapitre. Le module Mémorisation offre aux niveaux supérieurs de l'architecture logicielle (p.56) des primitives agissant sur les données mémorisées. Les autres modules ont conscience de travailler sur des fichiers et des listes mais leur organisation interne n'est connue que du module Mémorisation chargé de leur donner l'information souhaitée.

Convention : Toutes les coordonnées des points mentionnés sont exprimées dans le repère ayant pour origine le coin supérieur gauche de la fenêtre contenant le modèle de terrain. (fig.25).

4.1.UTILITE ET DESCRIPTION DES LISTES CHAINEES

4.1.1. LISTES ATTACHEES AU MODELE DE TERRAINS

Un modèle de terrains susceptible de représenter les formations géologiques en profondeur est introduit à l'écran par l'utilisateur. Il est employé afin de calculer la dromochronique théorique. Un maximum de dix couches géologiques est autorisé pour la représentation du sous-sol. Les interfaces entre milieux sont approximées par une série de segments de droite épousant aux mieux les irrégularités des terrains.(fig.25).

Un vecteur à dix composants initialise les listes chaînées. A chaque interface est associée une chaîne regroupant les caractéristiques des segments qui la constitue. La structure peut se représenter comme indiquée à la figure 26 .

Chaque noeud de la liste correspondant à un segment possède dix informations :

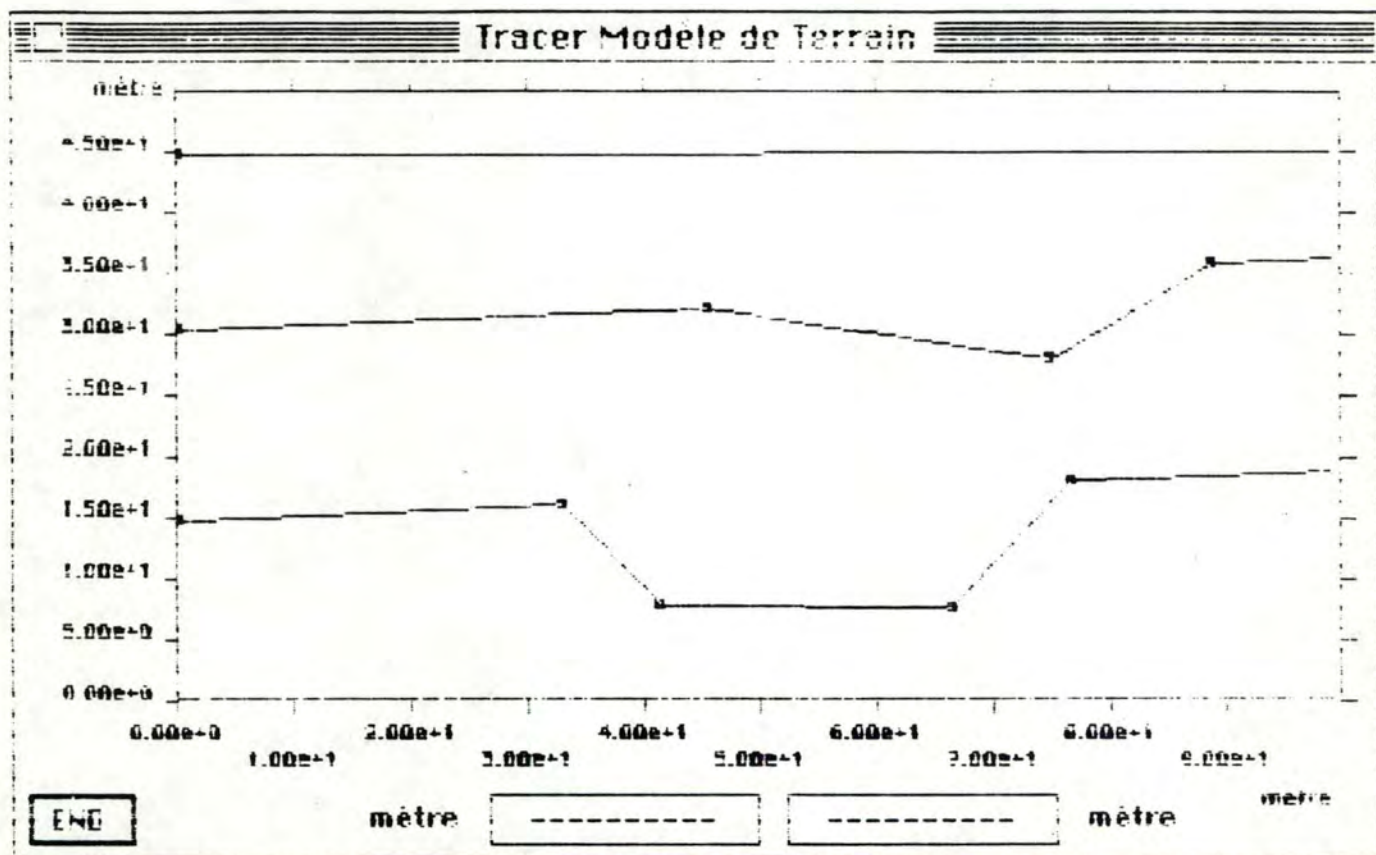


Figure 25 . Représentation d'un modèle de terrain comportant trois interfaces.

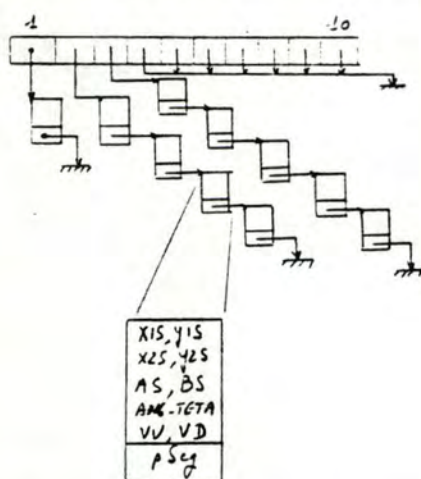


Figure 26 . Ensemble des listes chaînées attachées au modèle de terrain de la figure .

- $X1S, X2S,$
 $Y1S, Y2S$: coordonnées des points constituant les extrémités du segment .
 AS, BS : coefficient A et B de l'équation de la droite représentant le segment.
 $ANG-TETA$: angle d'inclinaison. (cfr ci-dessous)
 VU : vitesse de la couche au-dessus du segment. (cfr ci-dessous)
 VD : vitesse de la couche en-dessous du segment. (cfr ci-dessous)
 $pSeg$: pointeur vers le noeud suivant. Il vaut 'NIL' si la fin de la chaîne est atteinte.

L'angle d'inclinaison d'un segment est exprimé dans un repère ayant pour origine l'extrémité de coordonnée $(X1S, Y1S)$ située sur un axe horizontal. Les deux quadrans au-dessus de l'axe sont gradués en unités positives, les deux autres en valeurs négatives. L'origine des unités étant situées sur l'axe même, à la droite du point $(X1S, Y1S)$. (fig.27)

Le repère d'inclinaison peut paraître complexe, néanmoins les inclinaisons de tous les segments exprimées de cette manière facilitera les calculs relatifs à la propagation des rayons dans le modèle.

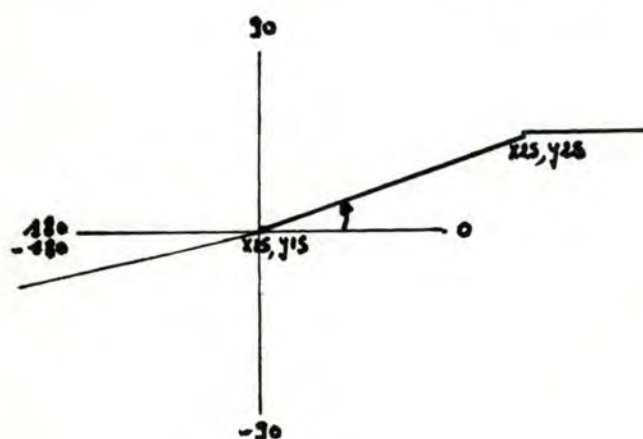


Figure 27 . Le repère d'inclinaison d'un segment.

En plaçant le segment horizontalement de manière à ce que l'extrémité $(X1S, Y1S)$ soit à gauche de l'extrémité $(X2S, Y2S)$, la partie située au-dessus de la droite identifie la couche supérieure tandis que celle en-dessous caractérise le milieu inférieur.

Toute correction du modèle entraîne une modification des listes. Ce problème important sera analysé au chapitre 5 .

4.1.2. LISTES ATTACHEES AUX POINTS DOUBLES

Chaque interface présentant des irrégularités importantes comporte des points doubles. (p.23). Les plus intéressantes, c'est à dire celles pour laquelle la déclinaison formée atteint 60 degrés sont enregistrées dans une liste chaînée. La structure des listes est identique à celle représentée à la figure 26. Chaque noeud identifiant un point double regroupe sept informations :

XPD, YPD	: coordonnées d'un point double appartenant à une interface.
numSeg1, numSeg2	: numéro des segments d'une interface formant la déclinaison (p.74)
ANG-TETA1, ANG-TETA2	: angle d'inclinaison des segments
pPD	: pointeur vers le noeud suivant . Il vaut 'NIL' si la fin de la liste est atteinte

Une liste est modifiée dès que l'interface correspondant subit les corrections introduites par l'utilisateur.

4.1.3. LISTE ATTACHEE AUX POINTS TRIPLES

La rencontre de deux interfaces crée un point triple.(p.29). Afin de faciliter le traitement découlant de l'interaction entre un rayon critiquelement réfracté et ce type de point, une chaîne unique regroupant l'ensemble des points est constituée. Chaque noeud de la liste comporte douze données importantes:

XPT, YPT	: coordonnées du point triple
numSeg1,	
numSeg2,	
numSeg3	: numéro des interfaces auxquels appartiennent les segments (p.74)
ANG-TETA1,	
ANG-TETA2,	

ANG-TETA3: angles d'inclinaison des segments

pPT : pointeur vers le noeud suivant. Il est égal à 'NIL' si la fin est atteinte.

Cette chaîne subit également des modifications en fonction des corrections du modèle.

4.1.4. LISTES ATTACHEES AUX GEOPHONES

Le logiciel a pour but l'obtention des dromochroniques théoriques correspondant aux courbes expérimentales. Il faut donc rechercher les temps de parcours minimum des rayons se propageant dans les couches et atteignant les géophones en surface. Les trajets de ces rayons vont être enregistrés dans des listes chaînées.

Une liste attachée à chaque récepteur se compose d'un ensemble de coordonnées identifiant un point appartenant à une interface dans le modèle. La figure 28 représente la structure. Chaque noeud comporte les informations suivantes :

x,y : coordonnées d'un point

pMod : pointeur vers le noeud suivant . Il est égal à 'NIL' si la fin est atteinte.

Une liste est entièrement renouvelée si un rayon atteignant un géophone a parcouru un trajet plus rapide que le rayon détecté précédemment.

3.2. UTILITE ET DESCRIPTION DES FICHIERS

3.2.1. FICHIER DES DROMOCHRONIQUES

Le fichier est employé pour l'enregistrement de toutes les dromochroniques expérimentales introduites par l'utilisateur. Une courbe se compose au maximum de 36 données : un point d'ébranlement et des géophones. Chaque donnée est représentée sur écran par un point. Un repère exprimé dans les unités spécifiées par l'utilisateur permet une localisation précise des points. L'axe des abscisses représente une distance et l'axe des ordonnées un temps de parcours.(fig.29).

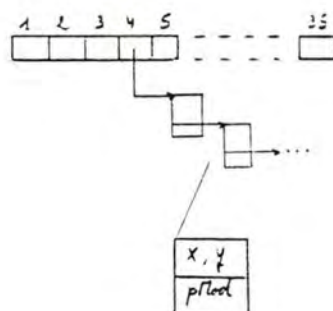


Figure 28. Ensemble des listes chaînées attachées aux géophones.

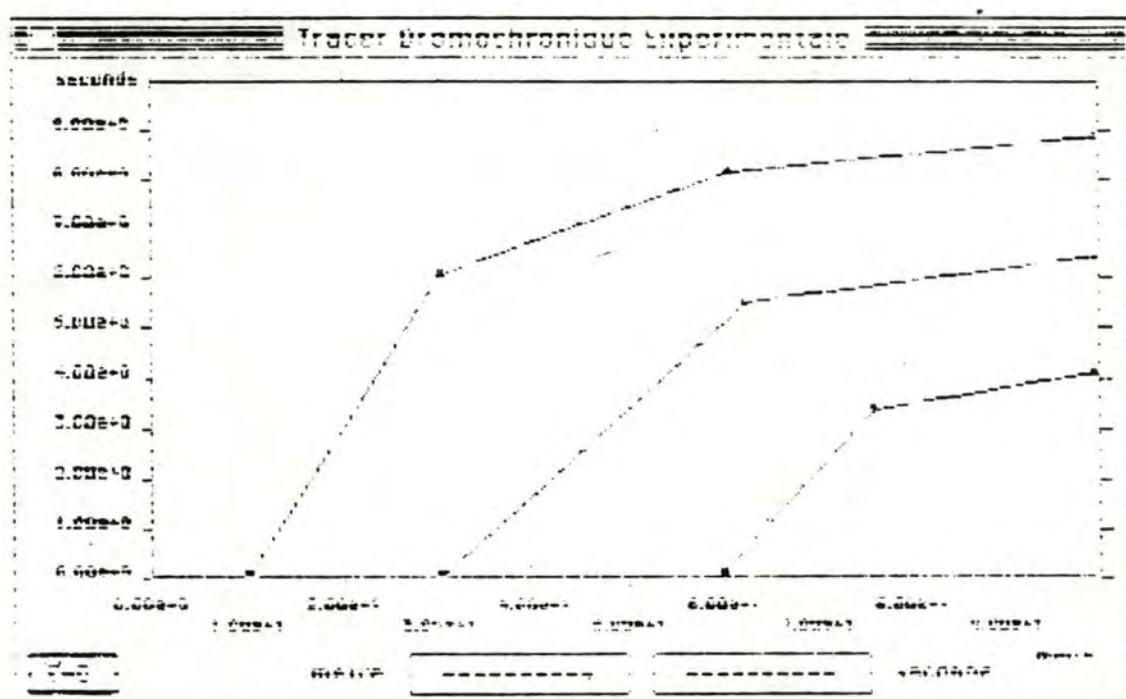


Figure 29 . Repère pour l'introduction des dromochroniques expérimentales.

Un couple (x,y) de coordonnées identifie un point d'impact ou un récepteur. Il constitue un enregistrement du fichier. La séparation des ensembles de points stockés représentant les courbes est effectuée à l'aide d'une **marque**. Cette dernière est constituée d'un couple de coordonnées ayant reçu comme valeur le plus grand entier positif représentable de la machine. La structure du fichier est représentée à la figure 30 .

L'enregistrement de toutes les courbes effectuées, le fichier est uniquement utilisé en lecture afin de

visualiser sur écran une dromochronique particulière ou l'ensemble des courbes. Il ne sera plus modifié.

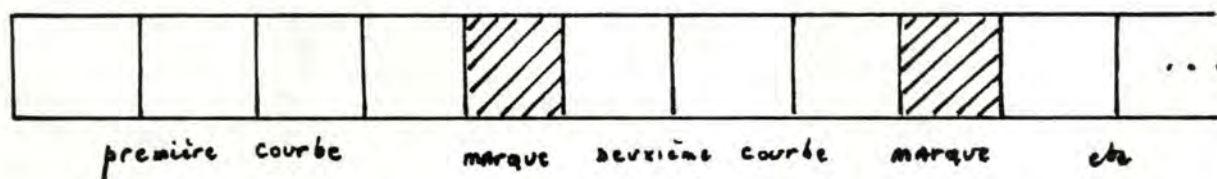


Figure 30 . Structure du fichier des dromochroniques représentées à la figure 29 .

4.2.2. FICHER DU MODULE DE TERRAIN

Ce fichier est utilisé pour l'enregistrement du modèle . Les points représentant les extrémités des segments composant les interfaces sont introduits par l'utilisateur. Il dispose pour ce faire d'un repère ; l'axe des abscisses reprenant les mêmes distances que celles utilisées dans le repère des dromochroniques et l'axe des coordonnées représentant la profondeur des différentes couches. Les couples (x, y) de coordonnées identifiant les points constituent les enregistrements du fichier. Une marque est utilisée afin de séparer les interfaces. Par conséquent, la structure du fichier est équivalente à celle décrite par la figure 30 ; les courbes étant remplacées par les interfaces. Il est important de signaler que ce fichier est provisoire. En effet, certaines opérations devront être entreprises sur ces données. La représentation minutieuse des formations géologiques sera contenue dans les listes chaînées attachées au modèle. (p.62). Les mécanismes de transformation permettant le passage du fichier aux listes seront développés en détail au chapitre 5.

4.2.3. FICHER DE MODIFICATION DU MODELE

La confrontation des dromochroniques expérimentales et des courbes théoriques obtenues par le calcul des temps de propagation des rayons à travers les formations géologiques peut impliquer la modification du modèle de terrains. Dans ce cas, l'utilisateur doit corriger un ensemble d'interfaces. Le fichier contiendra les coordonnées des points extrémités des nouveaux segments constituant une partie ou l'entièreté d'un seul contact géologique. Sa structure peut se représenter

par la figure 31. Des mécanismes de transformation utilisent ces données afin de modifier la représentation du modèle contenue dans les listes chaînées. Ensuite, le fichier sera réutilisé pour la correction d'une autre interface.

4.2.4. FICHIER D'INTERSECTION

Pour l'obtention d'une dromochronique théorique, il est indispensable de considérer un ensemble de rayons issus du point d'impact et se propageant dans le modèle de terrains. Le parcours de chacun de ces rayons sismiques est calculé en temps. Le problème consiste à repérer les points d'intersection identifiant le trajet et résultant de la rencontre d'un rayon et d'un segment d'une interface. Pour ce faire, la droite représentant le rayon est confrontée aux segments de tous les interfaces du modèle. Le fichier enregistre les coordonnées des points vérifiant les équations de cette droite et des segments. Un traitement supplémentaire sur ces données sélectionnera le point d'intersection souhaité qui sera ensuite enregistré dans le fichier de parcours d'un rayon. (cfr point suivant)

La structure du fichier est identique à celle présentée à la figure 32. Si le rayon sort des limites du domaine, aucune intersection n'est décelée. Dès lors, le premier champ du fichier est constitué de la marque.

4.2.5. FICHIER DU PARCOURS D'UN RAYON

Le fichier contient l'ensemble des points constituant le trajet d'un rayon se propageant dans les différentes couches géologiques. Utilisons un exemple pour comprendre son rôle :
Le premier champ du fichier contient les coordonnées précises du point d'ébranlement . Ensuite le parcours entre les couches est identifié par une série d'intersection représentés sur la figure 33 par A, B. Dès qu'une réfraction totale survient , le rayon se propage le long du segment intersecté et génère une série de rayons réfractés. Le logiciel considère , en fonction du point d'arrivée (C) et de la direction du rayon, un ensemble de points régulièrement espacés (D,E, F, G) sur le segment où la réfraction est étudiée ; l'écart entre ces points dépendant de la profondeur de l'interface. Une marque est enregistrée dans le fichier après que le premier de ces points ait été atteint par le rayon. Dès lors, le trajet du nouveau rayon réfracté est considéré . Les points H,I sont stockés. Si le rayon

heurte la surface sans atteindre un géophone, les données récoltées ne sont pas significatives et peuvent être abandonnées. Par contre, la détection par un récepteur conduit à deux scénarios envisageables.

—> Le temps de parcours du rayon est inférieur au temps du rayon précédemment détecté pour ce même capteur. Dans ce cas, les informations significatives du fichier sont incorporées dans une nouvelle liste attachée au géophone concerné. (p.66).

—> Le temps de parcours est plus important que celui relatif au rayon précédent. Les données peuvent être écrasées.

Le traitement du rayon étant terminé, la position courante du fichier est amenée sur la marque. Le point E de l'interface est enregistré. Une nouvelle marque est positionnée. La situation précédente peut de nouveau être envisagée jusqu'au moment où la gestion du rayon critiquelement réfracté prend fin. Cette situation sera analysée en détail au chapitre suivant. La structure du fichier est représentée à la figure 34 .

La majorité des fichiers est utilisée pour l'enregistrement d'informations provisoires. Ces dernières peuvent être transformées dans les listes chaînées ou supprimées. Cette technique permet une gestion plus souple des données et évite une multiplicité trop importante de fichiers ou de listes.

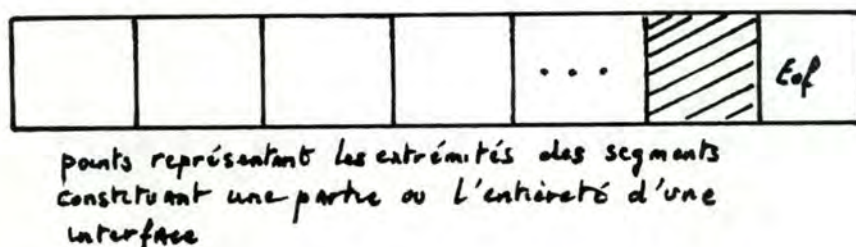


Figure 31. Structure du fichier de modification du modèle.

point d' impact	A	B	C	D		H	I	un point en surface	Eof
-----------------------	---	---	---	---	--	---	---	---------------------------	-----

point d' impact	A	B	C	D	E		J
-----------------------	---	---	---	---	---	--	---	-----	-----

Figure 32. Structure du fichier de parcours d'un rayon en relation avec la figure 33 .

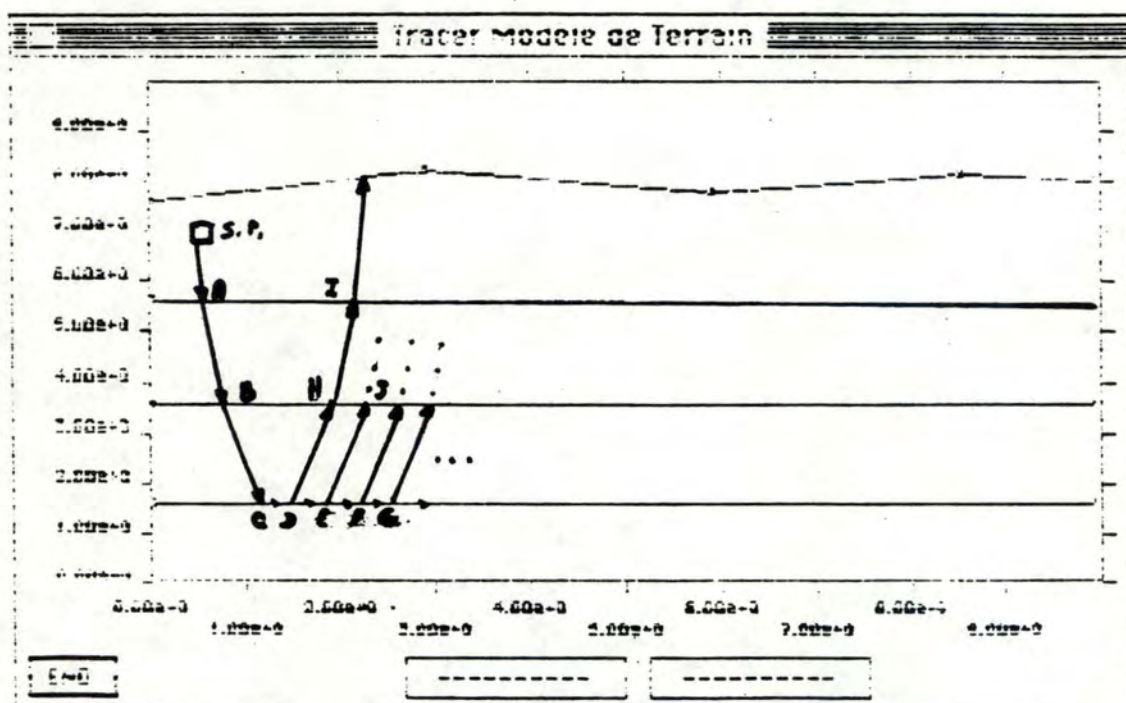


Figure 33. Exemple de parcours d'un rayon subissant une réfraction totale.

Chapitre 5

ANALYSE DE LA PROCEDURE DE TRACAGE DES RAYONS SISMIQUES

L'étape la plus importante de l'application consiste à calculer la dromochronique théorique relative à un modèle de terrains et un dispositif sismique donnés. Ce chapitre décrit en détail la structure du programme réalisant cet objectif. De plus, les spécifications des procédures et fonctions importantes utilisées sont précisées.

Le module 'Calcul des rayons' de l'architecture fonctionnelle (p.56) effectue le traitement des calculs en employant principalement les primitives offertes par le module 'Traitement Spéciaux'.

5.1. PRINCIPE GENERAL DU TRAITEMENT

La détermination des trajectoires des rayons dans le modèle peut s'effectuer en considérant les étapes suivantes :

1) A partir du point d'ébranlement, un ensemble de rayons se propage dans toutes les directions. Un rayon est identifié par un angle d'incidence exprimé dans un repère centré sur le point d'origine du rayon (ici, le point d'impact) en considérant les angles dans un sens antihorlogique à partir de l'axe vertical. (**repère standard**).

La procédure **'InitRayon'** se charge de calculer le temps de parcours des rayons directs atteignant les géophones sans transiter par une autre interface.

Ensuite, tous les rayons sont successivement sélectionnés par incrémentation angulaire afin de calculer leur trajectoire dans les couches géologiques.

2) La procédure **'GeneralRayon'** détermine le parcours d'un rayon entre deux milieux successifs du modèle.

Pour ce faire, la loi de Snell ainsi que les informations caractérisant les segments des interfaces sont utilisées.

Cette procédure est appelée récursivement en fonction du nombre de couches traversées par le rayon.

3) Dès qu'une réfraction critique est décelée sur un segment, la procédure '**TraitRefrTot**' est activée.

Son but consiste à calculer le trajet du rayon glissant sur l'interface et à déterminer les caractéristiques des rayons réfractés générés par ce phénomène. Par conséquent, pour chacun de ces nouveaux rayons, la deuxième étape est réitérée tant que la surface n'est pas atteinte ou que le parcours du rayon est minimum en temps.

Dès que le rayon critique rencontre l'extrémité du segment, les phénomènes causés par la présence des points triples ou doubles sont étudiés. Les rayons issus des zones de diffraction éventuelles sont également pris en charge par la procédure 'GeneralRayon'. La gestion du rayon critique se termine à ce niveau.

Les différentes étapes sont exécutées de nouveau pour un autre rayon issu du point d'impact.

La figure 34 illustre le fonctionnement de la procédure de calcul.

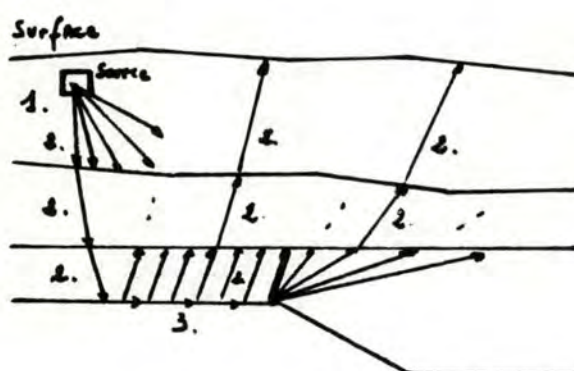


Figure 34 . Illustration du fonctionnement de la procédure de calculs

Les numéros identifient les traitements effectués par les différentes étapes.

5.2. DETAIL DE L'IMPLEMENTATION

5.2.1. LA PROCEDURE D'INITIALISATION

Plusieurs données introduites par l'utilisateur sont indispensables avant d'activer la procédure '**InitRayon**' de la première étape :

- Les dromochroniques expérimentales n'étant pas employées dans le traitement des rayons, elles doivent être néanmoins enregistrées dans un fichier avant de débiter cette étape.
- Le modèle de terrain composé d'un maximum de dix couches est indispensable. Sa représentation sous forme d'interfaces constituées de segments est contenue dans un ensemble de listes chaînées situées en mémoire centrale. (p.62)
Chaque intervalle réelle, c'est à dire approximant un contact géologique existant, est identifié par un numéro strictement positif ; la surface porte le chiffre un qui est incrémenté d'une unité chaque fois qu'une couche différente apparaît dès que l'on pénètre dans le sous-sol. De même, les segments des interfaces possèdent un numéro en fonction de leur ordre de création.
- La position du point d'impact situé en surface ou dans la première couche ainsi que l'emplacement des récepteurs doivent être connus.
- Les vitesses caractérisant les milieux ont été fournies par l'utilisateur.
- Les points doubles apparaissant dans chaque interface ainsi que les points triples éventuels sont répertoriés dans des listes chaînées présentes également en mémoire centrale. (p.65)
- Enfin, les différents fichiers utilisés par la procédure de calcul sont créés.

Dès que la procédure '**InitRayon**' déclenchant les mécanismes de calcul se termine, les rayons issus du point d'impact ayant atteint les géophones en un temps minimum ont été retenus. L'ensemble des temps récoltés aux récepteurs fournit la dromochronique théorique. La chaîne attachée à chaque capteur contient tous les points permettant de retracer la trajectoire du rayon enregistré dans le modèle. La structure de cette chaîne a été analysée p.66 .

5.2.1.1. Description de la procedure

L'organigramme de la procédure représenté à la figure 35 peut être décomposé en neuf niveaux. Chacun de ces niveaux fait l'objet d'une brève description :

1. Les fichiers d'intersection et de trajectoire d'un rayon sont ouverts. Leur rôle a été expliqué dans le chapitre 4. Les positions courantes des fichiers se situent sur le premier enregistrement.
2. La position du point d'impact est enregistrée dans le fichier de trajectoire d'un rayon. Le premier champ contiendra toujours cette valeur.
3. La procédure 'InitChainePtM' est activée afin d'initialiser toutes les listes attachées à l'ensemble des géophones éventuels. (35)
4. L'ensemble des rayons pour lesquels les trajectoires vont être calculées est déterminé.
L'activation d'une option dans un menu rendant 'ChoixCone' égal à 'vrai' fait que les rayons issus du point d'impact peuvent être concentrés dans un cône angulaire dont l'utilisateur fixe les limites. Cette méthode a l'avantage d'éviter de considérer un ensemble de rayons inutiles ou inintéressants en fonction de la position du point d'ébranlement. En effet, 'ChoixCone' étant faux, les rayons se propagent dans une zone fixée arbitrairement par le programme entre 90 et 270 degrés. Or, si la source se trouve en surface et à l'extrémité gauche du modèle, seules les rayons situés entre 180 et 270 degrés sont considérés dans le repère standard. (fig.36).

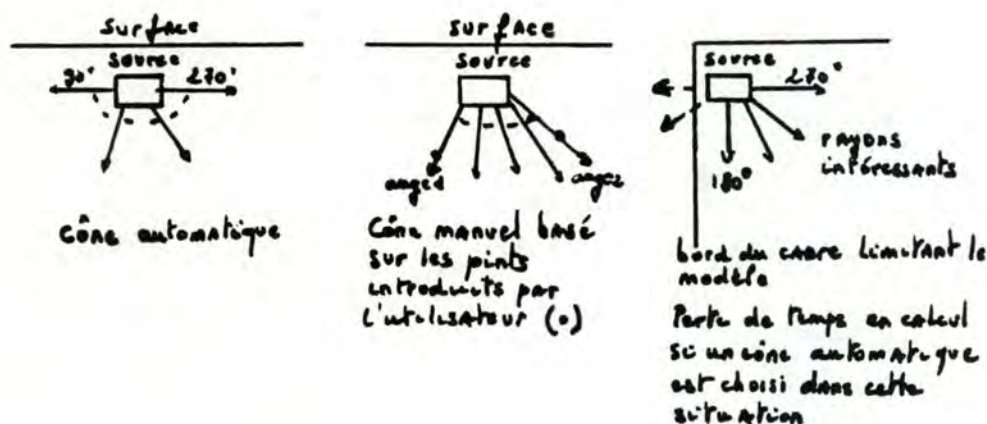


Figure 36. Représentation d'un cône angulaire.

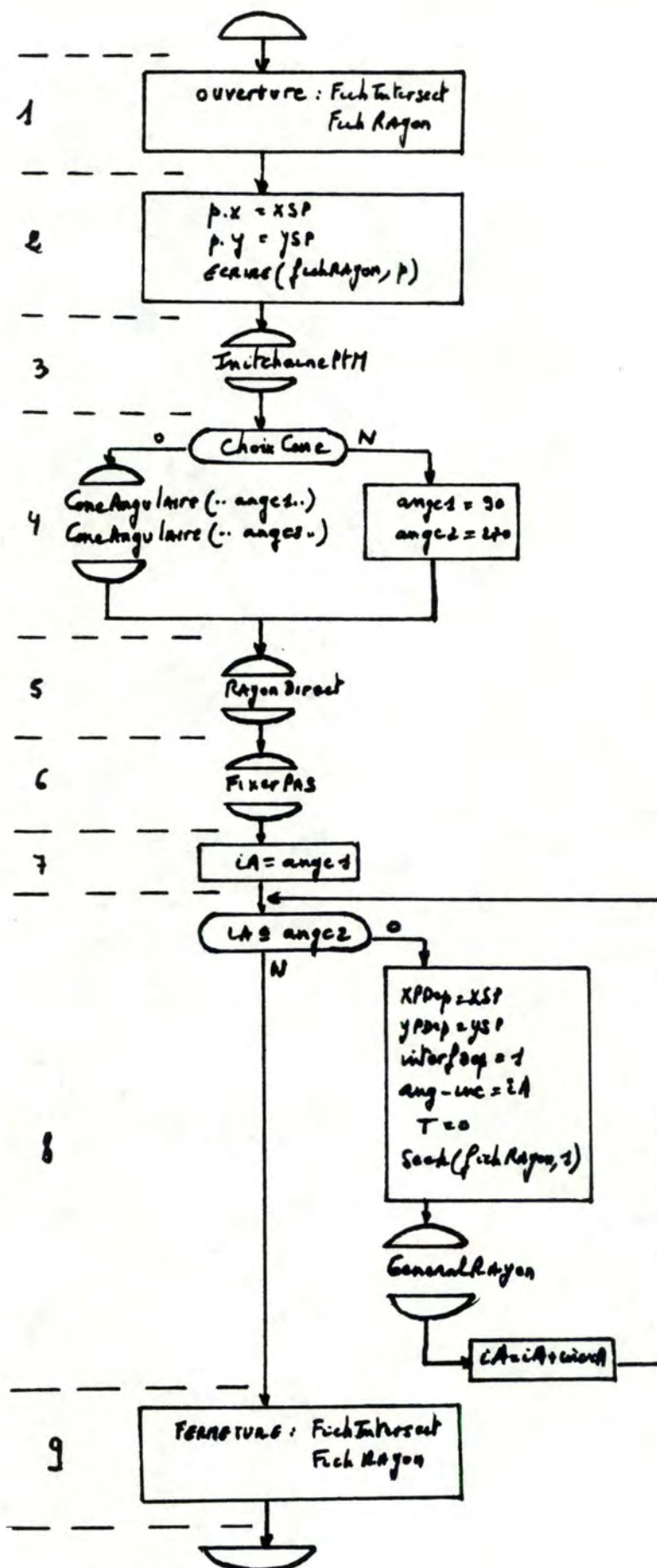


Figure 35. Structure de la procédure générale

'ChoixCone' étant vrai, la procédure '**ConeAngulaire**' est appelée. En fonction des limites du cône angulaire, les angles (angC1 et angC2) des rayons extrêmes sont calculés dans le repère Zonal.

5. Les parcours des rayons directs sont considérés.

La procédure '**RayonDirect**' calcule le temps de parcours de chacun des rayons joignant les récepteurs en fonction de la position de la source, du géophone et de la vitesse de la première couche. Ces temps sont enregistrés pour chaque capteur.

La valeur la plus élevée des temps de parcours est recherchée. (**TMax**). Elle servira de critère de sélection lors du calcul des temps des autres rayons. En effet, la dromochronique étant constituée de temps de parcours minimum, une valeur supérieure à 'TMax' occasionnera l'abandon du rayon considéré.

6. Les pas d'incrémentation utilisés lors d'une réfraction critique sont initialisés.

Lors d'une réfraction critique, le rayon se propage le long du segment de l'interface intersecté. Dès lors, par la loi de Snell, des rayons réfractés sont générés en chaque point du segment. Il serait fastidieux de considérer le temps de propagation de tous ces rayons. Par conséquent, des pas d'incrémentation dont la valeur dépend de l'interface rencontrée ont été fixés. Ils correspondent au glissement du rayon critique sur le segment.

Par exemple, si la valeur du pas vaut 10, en fonction du point d'intersection et de la direction du rayon incident, un premier rayon réfracté sera considéré seulement 10 points après le lieu de rencontre sur l'écran, le deuxième 20 points après et ainsi de suite jusqu'à l'extrémité du segment. Dans ce cas, par la résolution graphique du Macintosh, la valeur 10 correspond à peu près à une incrémentation tous les 3,5 mm. (cfr chapitre suivant).

La procédure '**FixerPas**' est activée pour l'initialisation de ces pas.

7. La condition d'une boucle est initialisée :

'iA' est une variable contenant la valeur angulaire identifiant un rayon issu du point d'impact pris comme origine du repère. (repère standard). La première valeur vaut 90 si 'ChoixCone' est faux. Sinon, 'iA' reçoit la première limite 'angC1' du cône angulaire créé par l'utilisateur identifiant le premier rayon dont la trajectoire doit être calculée.

8. Le corps de la boucle est exécuté.

--> Un ensemble d'affectation de variable est réalisé :

XPDep, YPDep : coordonnées identifiant l'intersection d'un rayon avec un segment d'une interface générant un rayon réfracté, ou relatif au point d'ébranlement donnant naissance aux rayons.

Dans ce cas, la deuxième alternative est choisie, il s'agit du point de départ de tout trajet dans le modèle.

Le repère standard est toujours centré sur ce type de point.

ang-inc : reçoit la valeur 'iA'. Cette variable sera modifiée par la procédure auxiliaire appelée par la suite.

InterfDep : numéro de l'interface contenant le segment intersecté. Si XPDep et YPDep identifie la source, "interfDep" représente la surface même si le point d'impact est situé dans un puits en profondeur.

T : le temps de parcours du nouveau rayon est initialisé à zéro. Il sera incrémenté au fur et à mesure de la pénétration du rayon dans les couches en fonction de la distance parcourue et des vitesses.

--> La position courante du fichier de trajectoire des rayons est positionné sur le deuxième enregistrement .

Le premier champ identifiant le point d'impact origine de tout trajet, le premier point d'intersection entre le rayon et les interfaces sera écrit dans le champ suivant . Si le corps de la boucle est exécuté pour la $n^{\text{ième}}$ fois, ce deuxième enregistrement contient déjà les coordonnées relatives au premier point d'intersection du $n-1^{\text{e}}$ rayon issu de la source. Il sera donc écrasé ainsi que les suivants au fur et à mesure du traitement . Il est donc impératif que ces anciennes données aient été sauveées, si nécessaire, avant de réitérer la boucle.

--> La procédure 'GeneralRayon' est activée. Son rôle ainsi que ses spécifications font l'objet du paragraphe suivant. Un autre rayon est défini par incrémentation angulaire (incrt). Ce point est réalisé dès que la gestion du rayon précédent est totalement terminée.

9. Les fichiers de l'intersection et du parcours d'un rayon sont fermés.

5.2.2. LA PROCEDURE DE DETERMINATION DU PARCOURS ENTRE COUCHES SUCCESSIVES.

La procédure '**GeneralRayon**' constituant la deuxième étape du traitement général possède la structure représentée à la figure .

Plusieurs problèmes doivent être résolus :

1. En fonction du point origine (XPDep, YPDep) et de la direction du rayon, l'intersection avec un segment d'une interface doit être trouvée.
2. La loi de Snell est appliquée afin de déterminer les caractéristiques éventuelles du rayon après l'interaction .
3. Des traitements annexes sont activés en fonction de l'interface intersecté et /ou de la valeur de l'angle de réfraction évalué par la loi de Snell.
 - 3.1. Si l'angle de réfraction vaut 90 degrés, une réfraction critique a lieu. La procédure '**TraitRefrTot**' constituant la troisième étape du traitement général est appelée afin de gérer cette situation . Sa description est présentée au chapitre suivant.
 - 3.2. L'interface intersecté étant la surface, le rayon doit atteindre un géophone. Dans ce cas, son temps de parcours doit être minimum par rapport au temps d'un rayon précédemment enregistré. Dès lors, les points identifiant son trajet dans le modèle de terrain sont sauvés.
 - 3.3. Si le contact géologique rencontré contient également le point d'origine, la procédure '**CasSpecial**' est activée afin de traiter éventuellement une réfraction totale. Celle-ci n'est plus identifiée par la loi de Snell. Elle provient de l'interaction entre un rayon et l'extrémité d'un segment constituant une déclinaison importante. Le rayon doit être situé dans une zone de diffraction centrée sur l'extrémité pour que le phénomène se déroule. Cette situation sera analysée au chapitre suivant.

5.2.2.1. Description de la procedure

L'organigramme présenté à la figure se compose de 14 parties importantes. Une brève description est fournie pour chacune d'elles :

- 1) Les coefficients A et B de l'équation de la droite représentant le segment sont calculés. La procédure '**ABDroite**' se charge de ce travail.
- 2) L'indice courant du fichier d'intersection du rayon est amené sur le premier champ.
- 3) Deux boucles sont exécutées :
Les boucles ont pour but de rechercher et d'enregistrer tous les points d'intersection entre la droite caractérisant le rayon et tous les segments de toutes les interfaces constituant le modèle de terrain.

Première étape :

Toutes les interfaces réellement introduites par l'utilisateur (NbrInterface) sont prises en considération .

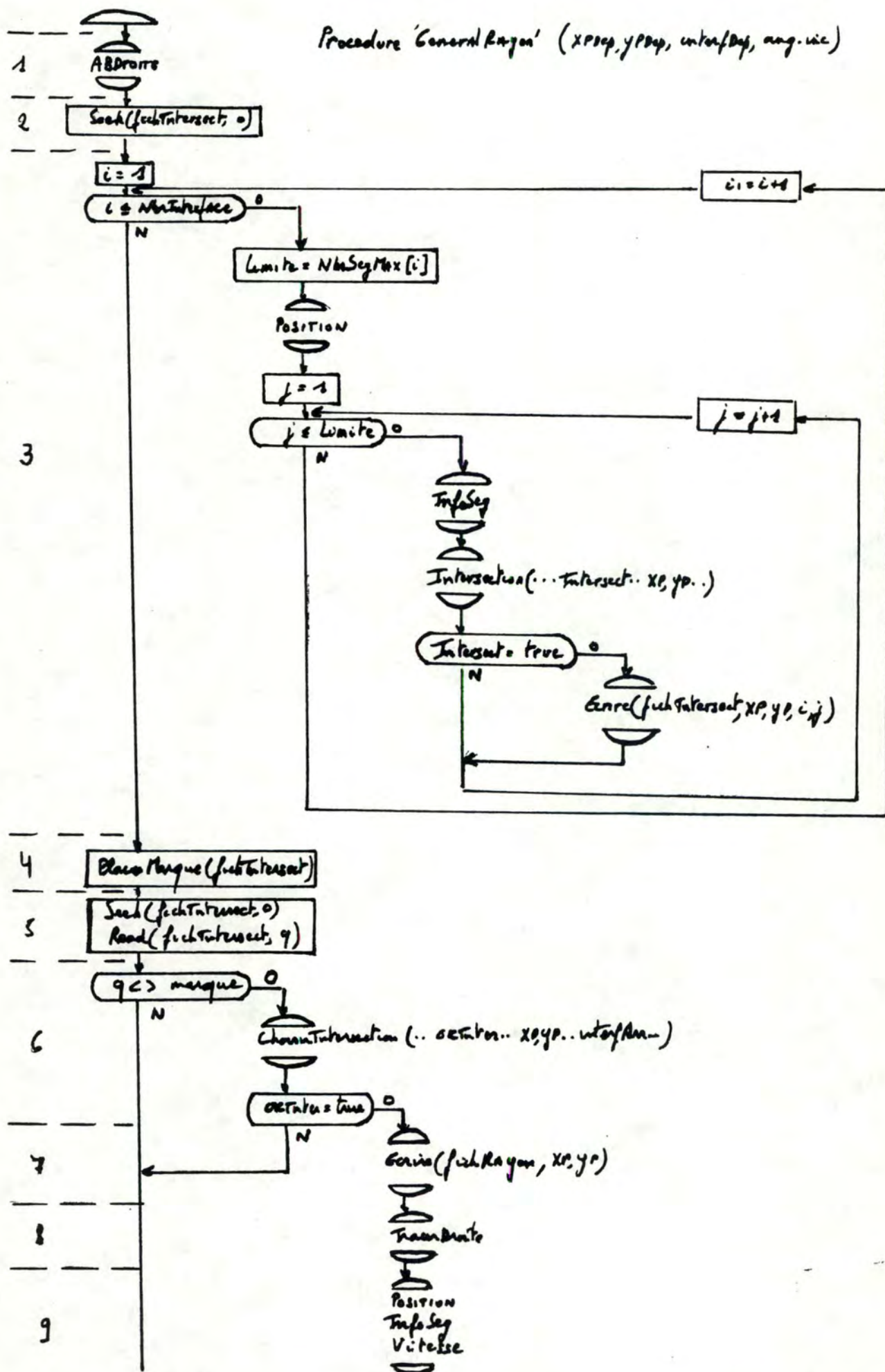
Le nombre maximum de segments constituant un contact géologique est calculé . (Limite). La procédure '**Position**' est activée afin d'accéder aux données caractérisant le premier segment de l'interface .

Deuxième étape :

Tous les segments d'une interface sont pris en compte . La procédure '**InfoSeg**' et '**Intersection**' sont successivement appelées. '**InfoSeg**' fournit les renseignements du segment concerné et '**Intersection**' renvoie un booléen '**Intersect**' volant '**Vrai**' si un point de coordonnées (XP, YP) appartenant à un segment , vérifie les équations des droites représentant le segment et le rayon.

Les coordonnées du point d'intersection (XP, YP) ainsi que le numéro de l'interface et du segment intersecté sont enregistrés dans le fichier d'intersection du rayon.

Enfin, les informations du segment suivant sont accessibles. Cette étape est exécutée tant que le dernier segment de l'interface n'est pas atteint. Dès que celui-ci survient, le premier segment de l'interface suivante éventuelle est considéré.



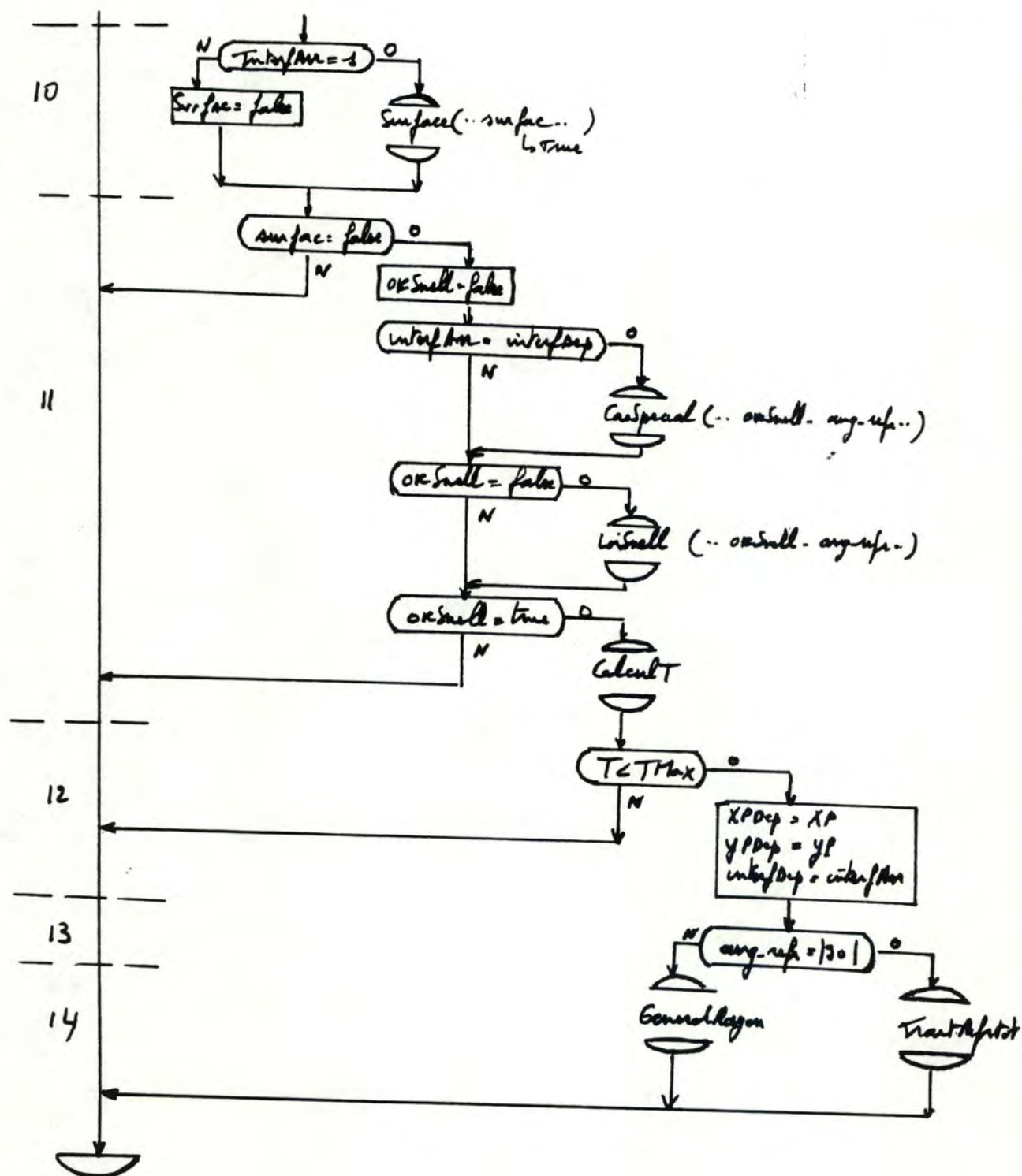


Figure 37. Structure de la procédure auxiliaire 'GeneralRayon'.

4) Une marque est placée dans le fichier d'intersection du rayon. Si aucune intersection n'est survenue, cette marque constitue le premier enregistrement .

5) La position courante du fichier d'intersection est située sur le premier enregistrement qui est ensuite lu.

6) Une condition est atteinte.

Si la marque se situe au début du fichier (cfr point 4) le rayon sortant du modèle est abandonné. La procédure se termine à ce niveau.

Par contre, si au moins une intersection existe, la procédure '**choisirIntersection**' est appelée. Elle renvoie le boolean 'OKInter' évalué à 'Vrai' si un point d'intersection de coordonnées (XP, YP) présent dans le fichier d'intersection correspond au véritable point recherché. Ce dernier étant repéré par la direction du rayon et son origine.

La figure 38 illustre le traitement.

Ces six premiers points permettent la résolution du premier problème énoncé au paragraphe précédent.

7) Le point (XP, YP) retenu est incorporé à la liste constituant la trajectoire du rayon.

8) Une droite représentant le rayon est tracée à l'écran.

9) Les procédures '**Position**', '**InfoSeg**' et '**Vitesse**' sont activées séquentiellement. Les deux premières fournissent les informations du segment intersecté par le rayon contenant le point d'intersection.

'Vitesse' détermine en fonction de l'inclinaison du segment et de la direction du rayon la vitesse de la couche inférieure et supérieure au segment . (p.57)

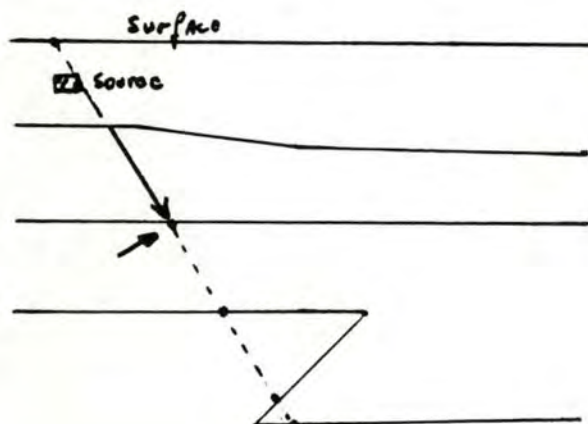


Figure 38. Détermination de l'intersection d'un rayon et d'un segment d'interface.

Les différents points sont repris dans le fichier d'intersection. Celui repéré par une flèche constitue le véritable point d'intersection recherché.

10) Si la surface est atteinte ($\text{interfArr} = 1$), la procédure '**Surface**' est appelée.

Le rayon touchant un géophone, les coordonnées du récepteur sont enregistrées dans le fichier du parcours du rayon. Le temps de parcours est calculé et comparé au temps enregistré du rayon précédemment détecté.

L'obtention d'un meilleur temps conduit à la destruction de la liste attachée au géophone. Une nouvelle liste contenant les points identifiant la trajectoire du nouveau rayon est créée.

Par contre, un temps plus important provoque le déplacement de la position courante du fichier de parcours sur la dernière marque existante ou le cas échéant au début de celui-ci. Cette dernière action est également déclenchée si le rayon ne touche aucun géophone.

Cette procédure résout le problème 3.2. décrit dans le paragraphe précédent.

11) Le traitement se poursuit si le rayon n'atteint pas la surface. Dès lors, trois conditions interviennent afin de résoudre les problèmes 2 et 3.1. exposés dans le paragraphe précédent.

--> Première condition :

Si l'interface intersectée par le rayon est identique à l'interface de départ, une procédure 'CasSpecial' est activée. Son but est de vérifier si le rayon rencontre une extrémité d'un segment qui est également un point double répertorié dans la liste associée à l'interface. Dans la théorie relative au traitement des points spéciaux, seule l'interaction entre un point de ce type et un rayon subissant une réfraction **totale** est considéré. Généralement, pour un rayon simplement réfracté, cette situation est traitée comme si le point représentant l'extrémité appartient à un seul des deux segments repéré par le numéro le plus faible.

Par contre, quand il s'agit de la propagation et de l'intersection dans une même couche, ce phénomène doit être étudié car il peut avoir des répercussions importantes sur le temps de parcours. En effet, en fonction de son orientation, le rayon peut subir une réfraction totale sur un des deux segments formant la déclinaison.

Si le cas survient, 'OKSnell' de la procédure est vrai. Sinon, il s'agit d'une rencontre ne donnant lieu à aucun traitement spécial et 'OKSnell' est faux. Cette procédure sera étudiée dans le chapitre suivant.

--> Deuxième condition :

La procédure 'LoiSnell' est exécutée si la situation décrite ci-dessus ne s'est pas réalisée. En fonction de la direction du rayon incident, de l'inclinaison du segment intersecté et des vitesses des couches, la procédure basée sur la loi de Snell calcule la valeur de l'angle de réfraction exprimé dans le repère standard.

Le boolean 'OKSnell' reçoit la valeur 'Faux' si le rayon ne donne lieu à aucune réfraction.

--> Troisième condition :

Le temps entre les points d'arrivée (XP, YP) et de départ (XPDep, YPDep) est calculé en fonction de la vitesse de la couche traversée. Ce temps est ajouté au temps de parcours (T) depuis le point d'ébranlement. La procédure 'CalculT' effectue ce

traitement si la loi de Snell est vérifiée.

12) Le temps de parcours est comparé au temps maximum enregistré pour les géophones.

Si la valeur du temps de parcours est supérieure, le trajet ne pouvant être minimum au temps, le rayon est abandonné.

Par contre, si le rayon subsiste, le point d'intersection (XP, YP) et l'interface d'arrivée 'interfArr' deviennent le nouveau point de départ (XPDep, YPDep) et l'interface de départ 'interfDep' du rayon.

13) Une condition portant sur une réfraction totale est rencontrée. Dans l'affirmative, la procédure '**TraitRefrTot**' est activée. Son but consiste à calculer les trajectoires des rayons réfractés issus du rayon longeant l'interface. Elle considère également les phénomènes résultant de la rencontre possible à l'extrémité du segment entre le rayon critique et un point spécial.

Cette procédure sera analysée au chapitre suivant.

Le problème 3.1. du paragraphe précédent est ainsi résolu.

14) Finalement, la procédure est appelée récursivement permettant ainsi le calcul de la trajectoire du rayon entre deux autres couches.

En résumé, un rayon est abandonné si les conditions suivantes surviennent :

1. aucune intersection valide n'est retenue. Le rayon quitte le modèle de terrains introduit par l'utilisateur.
2. la surface est atteinte. Si le rayon heurte un géophone, un traitement est appliqué avant l'abandon.
3. les conditions de Snell ne sont pas respectées ou une inversion de couche provoque une réfraction totale.
4. le temps de parcours du rayon n'est pas minimum.

5.3. SPECIFICATIONS DES PROCEDURES IMPORTANTES

Les procédures sont spécifiées par la technique d'assertions. Les arguments (données en entrée) et résultats (données en sortie) sont décrits ainsi que leur type.

Une brève description des procédures a été donnée dans les paragraphes précédents.

5.3.1. SPECIFICATIONS POUR LA PROCEDURE D'INITIALISATION

Procédure 'InitRayon':

arguments : /

précondition : mentionnées p74 .

résultats : /

postcondition :

- Parmi les rayons issus du point d'impact ayant atteint un même géophone , celui dont le temps de parcours est minimum a été retenu.
- L'ensemble des temps récoltés aux récepteurs fournit la dromochronique théorique.
- La chaîne attachée à chaque capteur contient tous les points permettant de retracer la trajectoire, dans le modèle, du rayon enregistré. La structure de cette chaîne a été analysée p. 66 .

Procédure 'ConeAngulaire':

argument :

XSP, YSP : integer

X, Y : integer

précondition :

- XSP, YSP sont les coordonnées identifiant le point d'impact.

- X, Y sont les coordonnées d'un point introduit dans le modèle par l'utilisateur. Ce point se situe sous ou sur la surface.

résultat :
 angc : real

postcondition :

- angc est une valeur angulaire caractérisant une limite de cône angulaire décrit **p.75** .
- $0 \leq \text{angc} \leq 360$ degrés dans le repère centré sur le point origine du rayon (dans ce cas , point d'impact) en considérant les angles dans un sens antihorlogique à partir de l'axe vertical. (**repère standard**).
- les limites de la zone sont données par angc1 et angc2 avec $\text{angc1} \leq \text{angc2}$.

Procédure 'RayonDirect' :

argument :/

précondition :

Un rayon direct est issu du point d'impact et atteint un géophone sans transiter par une autre interface . Il se propage donc dans la première couche.

résultat :/

postcondition :

- Une ligne joignant le point d'ébranlement à chaque géophone est dessinée à l'écran. Elle représente le rayon direct.
 - Le temps de parcours de chacun des rayons joignant les récepteurs est calculé en fonction de la position de la source, du géophone et de la vitesse de la première couche.
- Les temps sont enregistrés pour chaque capteur.

5.3.2. SPECIFICATIONS DE LA PROCEDURE DE DETERMINATION DU PARCOURS

Procédure 'GeneralRayon' :

argument :

XPDep, YPDep, InterfDep : integer

ang-inc : real

précondition :

- XPDep, YPDep sont les coordonnées du point de départ du rayon. Il s'agit d'un point résultant de l'intersection d'un rayon et d'un segment ou du point d'impact.
- InterfDep est un numéro identifiant l'interface de départ. La surface est considérée si le point de départ est le point d'impact ; autrement, InterfDep identifie l'interface contenant le segment intersecté.
- ang-inc est un angle exprimé dans le repère standard :
 $0 \leq \text{ang-inc} \leq 360 \text{ degrés.}$

résultat :

XPDep, YPDep, InterfDep : integer

ang-inc : real

postcondition :

- Le nouveau point d'intersection éventuel (XPDep, YPDep) est enregistré dans le fichier de parcours du rayon.
- Le temps de propagation T du rayon a été calculé en fonction de la distance parcourue et de la vitesse du rayon.
- InterfDep indique l'interface contenant le nouveau point d'intersection
- ang-inc identifie la direction du rayon ayant pour origine le nouveau point d'intersection. (repère standard).
- Si le rayon a heurté un récepteur, son temps de parcours (T) a été confronté au temps enregistré (t) d'un rayon précédent.

Si $T < t$, la chaîne attachée au géophone est détruite. Une nouvelle liste est créée

en considérant les données contenues dans le fichier de parcours. Le nouveau trajet du rayon est enregistré.

Par contre, si $T > t$ ou si le rayon atteint la surface mais sans toucher un récepteur, la position courante du fichier de parcours est placée sur la dernière marque existante ou le cas échéant, au début de celui-ci.

Procédure 'ABDroite':

argument :

ang-inc : real

XPDep, YPDep : integer

précondition :

- ang-inc est exprimé dans le repère standard. Il identifie le rayon.
 $0 \leq \text{ang-inc} \leq 360$ degrés.
- XPDep et YPDep sont les coordonnées de l'origine du rayon.

résultat :

AD, BD : real

postcondition :

AD et BD sont les coefficients A et B de l'équation de la droite représentant le rayon.

Procédure 'Intersection':

argument :

ASeg, BSeg, AD, BD, ang-inc : real

XPDep, YPDep, X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 : integer

précondition :

- ASeg, BSeg sont les coefficients A, B de l'équation de la droite représentant le segment.
- AD, BD sont les coefficients A, B de l'équation de la droite représentant le rayon.

- ang-inc identifie le rayon dans le repère standard.
 $0 \leq \text{ang-inc} \leq 360$ degrés.
- XPDep, YPDep sont les coordonnées de l'origine du rayon.
- X_1, X_2, Y_1, Y_2 sont les coordonnées des extrémités du segment.

résultat :

XP, YP : integer

Intersect : boolean

postcondition :

- Intersect vaut 'Vrai' : un point de coordonnées (XP, YP) appartenant à un segment vérifie les équations des deux droites.

Intersect vaut 'Faux' : la droite du rayon et du segment sont parallèle et aucune intersection n'a été découverte, ou un point vérifie les équations mais ne se trouve pas sur un segment.

Procédure 'ChoisirIntersection' :

argument :

XPDep, YPDep : integer

ang-inc : real

précondition :

- XPDep et YPDep identifie l'origine du rayon.
- ang-inc précise la direction du rayon dans le repère standard.
 $0 \leq \text{ang-inc} \leq 360$ degrés.
- le fichier d'intersection contient au moins les coordonnées d'un point.

résultat :

XP, YP, InterfArr, segm : integer

OKInter : boolean

postcondition :

- Si OKInter est vrai : En fonction de la direction du rayon et de son origine, le fichier d'intersection étant parcouru, un seul point de coordonnée (XP, YP) est retenu. Il représente la véritable intersection entre le rayon et le segment de numéro 'segm' appartenant à l'interface d'arrivée de numéro 'InterfArr'.
- Par contre, si 'OKInter' est faux, le rayon n'intersecte aucun segment valide. Il est abandonné.

Procédure 'Vitesse' :

argument :

ang-inc, angle, VU, VD : real

précondition :

- ang-inc caractérise le rayon incident dans le repère standard.
 $0 \leq \text{ang-inc} \leq 360$ degrés.
- angle indique l'inclinaison du segment.
- VU, VD : vitesses caractérisant les couches au-dessus et en-dessous du segment concerné.

résultat :

V_1, V_2 : real

postcondition :

En fonction de la direction du rayon incident, V_1 identifie la couche dans laquelle il se propage et V_2 repère le milieu de l'autre côté du segment.

Si le rayon forme un angle compris entre $[0-90]$ ou $[270-360[$ degrés dans le repère standard, V_1 est identique à VU et V_2 à VD. Sinon, l'inverse se produit.

Procédure 'LoiSnell' :

argument :

angle, V_1 , V_2 , ang-inc : real

OKSnell : boolean

précondition :

- Oksnell est faux.
 - ang-inc identifie le rayon dans le repère standard.
 $0 \leq \text{ang-inc} \leq 360$ degrés.
 - angle représente l'inclinaison du segment intersecté.
 - V_1 est la vitesse de la couche dans laquelle se propage le rayon incident.
- V_2 caractérise le milieu de l'autre côté du segment.

résultat :

ang-inc, ang-refr, ang-inc-seg, ART : real

OKSnell : boolean

postcondition :

- 'OKSnell' est vrai :
 - ang-inc caractérise le nouveau rayon créé par la rencontre du rayon incident et du segment dans le repère standard.
 $0 \leq \text{ang-inc} \leq 360$ degrés.
 - ang-refr, calculé par la loi de Snell, est exprimée dans le repère standard modifié où la verticale du repère correspond à l'axe vertical par rapport du segment. Il représente l'angle i_2 dans la loi de Snell.
 $0 \leq \text{ang-refr} \leq |90|$ degrés.
 - ang-inc-seg caractérise le nouveau segment dans le repère standard modifié.
 $0 \leq \text{ang-inc-seg} \leq 360$ degrés.
- Si cet angle vaut 90 ou 270 degrés, le rayon subit une réfraction critique sur l'interface.
- ART ou angle de réfraction critique, calculé par la loi de Snell, est

également exprimé dans le repère standard modifié.

$$0 \leq \text{ART} \leq 90 \text{ degrés.}$$

Il sert de référence pour déterminer si le rayon subit une réfraction simple ou critique.

- 'OKSnell' est faux . La valeur des angles est quelconque.

Le rayon n'est pas intéressant :

- L'angle d'incidence du rayon est strictement supérieur à ART. Dans ce cas, il se propage dans une couche de vitesse inférieure à celle caractérisant la couche rencontrée.
- Si une inversion de couche se produit dans la configuration géologique, une réfraction critique est possible quand le rayon "remonte" vers la surface. Cette situation ne pouvant conduire à l'obtention d'un temps de parcours minimum, le rayon est abandonné.

Remarque : Par l'influence des différents calculs portant sur les angles, il se peut que la valeur de 'ang-inc-seg' soit légèrement différente de 90 ou 270 degrés lors d'une réfraction totale. Dès lors, une imprécision (precA) sur la valeur est acceptable. Toute valeur angulaire comprise entre $[90 - \text{precA}, 90 + \text{precA}]$ et $[270 - \text{precA}, 270 + \text{precA}]$ identifiera une réfraction critique.

Procédure 'CalculT':

argument :

XPDep, YPDep, XP, YP : integer

V_1 : real

précondition :

- XPDep, YPDep identifie l'origine du rayon.
- XP, YP caractérise le point d'intersection du rayon .
- V_1 est la vitesse de la couche dans laquelle se propage le rayon.
- Il est indispensable que les unités de l'axe des abscisses et des ordonnées introduites

par l'utilisateur afin de tracer le modèle de terrain soient identiques . Les valeurs maximales présentes sur ces axes sont définies.

résultat :/

postcondition :

Le temps entre les points de départ (XPDep, YPDep) et d'arrivée (XP, YP) est calculé en fonction de la vitesse de la couche traversée. Ce temps est ajouté au temps de parcours (T) depuis le point d'ébranlement.

Chapitre 6

SOLUTIONS APPORTEES A QUELQUES PROBLEMES RENCONTRES

6.1. NIVEAU DE L'INTERFACE

6.1.1. ENREGISTREMENT DU MODELE DE TERRAIN

Un des problèmes les plus importants consiste à enregistrer les données caractérisant un modèle de terrains introduit à l'écran par l'utilisateur. Ce modèle doit correspondre aux configurations géologiques présentes dans le sous-sol. Le paragraphe décrit en deux étapes la manière dont les informations doivent être introduites et enregistrées.

La première étape permet à l'utilisateur de tracer à l'écran un modèle de terrains et de placer les informations le caractérisant dans un fichier provisoire.

Un traitement est effectué sur ces données afin d'identifier les points doubles ou triples éventuels ainsi que pour repérer et caractériser les différents segments constituant les interfaces. Cette deuxième étape, dont le but est la création des listes chaînées associées au modèle, points triples et points doubles intervient dès que la conception du modèle est terminée. En effet, si la procédure de traitement avait été successivement exécutée après chaque interface dessinée, l'utilisateur aurait du attendre, dans certains cas, la fin du traitement pour poursuivre la création ou la modification du modèle.

Première étape :

Au départ, un repère dont l'axe des abscisses représente une distance (axe x) et l'axe des ordonnées une profondeur (axe y) est tracé à l'écran. Les unités qui le caractérisent sont introduites par l'utilisateur. Dès lors, les interfaces représentant le modèle peuvent être dessinées. Pour ce faire, un ensemble de segments épousant les irrégularités des contacts géologiques sont utilisés. Seuls les

points relatifs aux extrémités sont fournis par l'utilisateur.

Le premier point introduit correspond à une extrémité de coordonnées ($X1S$, $Y1S$) du premier segment. Le second représente l'autre bout de coordonnées ($X2S$, $Y2S$) et peut servir d'extrémité au segment suivant.

Le modèle comporte au maximum dix couches. Par facilité, des interfaces provisoires ou fictives susceptibles d'être modifiées par la suite peuvent être dessinées. Une interface introduite par l'utilisateur est valable si une des conditions suivantes est respectée : (fig.39).

- 1) Le premier point est situé sur l'axe des ordonnées. Le dernier point de l'interface est dessiné sur une droite parallèle à l'axe y ayant comme valeur d'abscisse la valeur maximale.
- 2) Le premier point situé dans le modèle est identique au dernier.
- 3) Le premier et dernier point sont situés sur l'axe des ordonnées ou sur une droite parallèle à cet axe ayant comme valeur d'abscisse la valeur maximale.
- 4) Le premier point se situe sur l'axe y, le dernier sur l'interface supérieure.
- 5) Le premier point est placé sur l'interface supérieure, le dernier sur une droite parallèle à l'axe y ayant une valeur d'abscisse égale à la valeur maximale.
- 6) Le premier et dernier point se trouvent sur l'interface supérieure.

La première interface dessinée représente la surface et doit respecter la première condition mentionnée ci-dessus.

Chaque contact géologique est identifié par un entier positif; la surface porte le numéro un et les interfaces suivantes une valeur successivement incrémentée d'une unité au fur et à mesure de leur création.

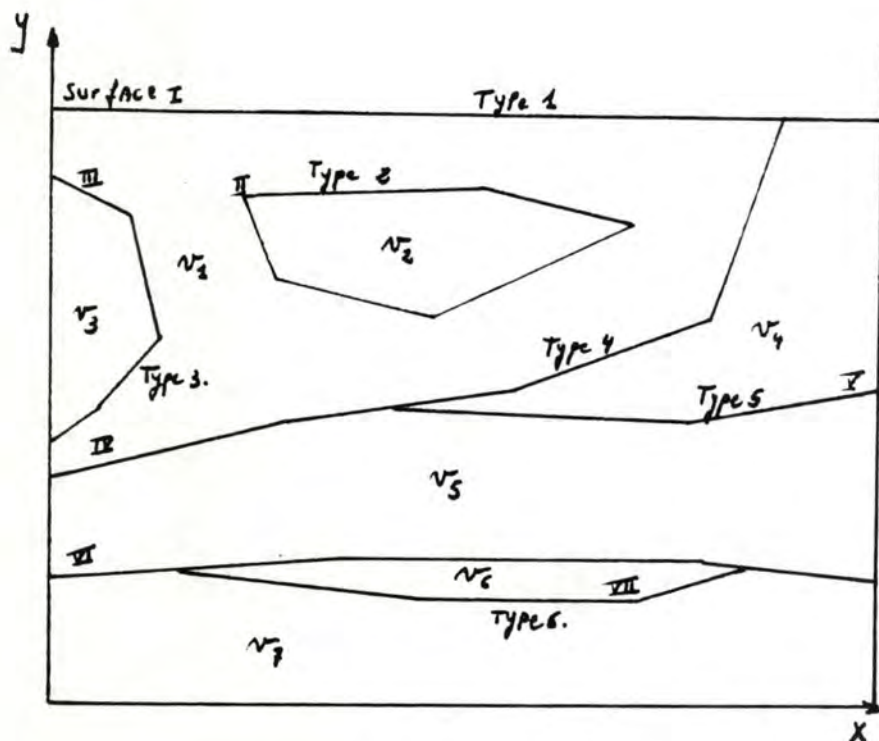


Figure 39 .Exemple de modèle de terrain constitué de sept interfaces.

En fonction de la position du second contact, on veillera lors de l'emplacement du dispositif sismique à respecter la précondition de la procédure 'Rayon Direct' (p.75).

Un fichier spécial attaché au modèle enregistre successivement tous les points. Une marque est placée entre chaque groupe représentant une interface fictive. La structure du fichier a été analysée p. 69 .

Dès que le dernier contact a été dessiné, les vitesses caractérisant les couches sont introduites par l'utilisateur. Une procédure spéciale employant un ensemble de mécanismes de transformation agissant sur les données du fichier est alors activée afin de créer des listes chaînées représentant fidèlement le modèle de terrains. L'utilité de cette procédure est décrite dans la seconde étape.

Deuxième étape :

Le fichier du modèle contenant au minimum les points représentant deux interfaces doit être disponible. De plus, sa structure est conforme à la figure 31 .

Le but consiste à créer pour chaque interface réelle une liste chaînée dont les noeuds contiennent les informations caractérisant les segments.

Pour ce faire, les étapes suivantes sont nécessaires .

Le fichier attaché au modèle est parcouru :

1) Les points caractérisant la surface sont lus.

En fonction des coordonnées ainsi que du numéro de l'interface les données attachées aux différents segments peuvent être calculées ou déduites ; angle d'inclinaison , vitesse V_1 et V_2 ...

De plus, un numéro caractérisant chaque segment construit est fixé. Une liste comprenant les informations est créée et attachée au contact géologique traité.

2) Le groupe de points situés avant la seconde marque présente dans le fichier est lu. La première étape décrite précédemment est considérée si aucune intersection, c'est à dire un point situé sur l'interface supérieure, ne survient. Sinon, les coordonnées du point sont retenues ainsi que le numéro du segment et de l'interface rencontrés. L'étape suivante est atteinte.

3) Un traitement spécial est activé si ce point est le dernier du groupe. Le respect de cette condition impose que le champ suivant du fichier contient la marque. Ce traitement modifie les listes déjà créées afin de représenter au mieux les véritables interfaces correspondant aux formations géologiques. Il est principalement basé sur les situations suivantes :

Au cours de la lecture d'un groupe de points correspondant à une interface fictive, une seule intersection peut survenir. Il s'agit , dès lors, du premier ou dernier point du groupe. Dans ce cas, toute la partie du contact supérieur comprise entre le premier point de l'interface supérieure et le point d'intersection ou du point d'intersection et du dernier point de l'interface supérieure doit être rattachée à l'interface en cours de traitement. Si plusieurs points d'intersection, autre que ces deux cas, apparaissent, la partie située entre deux points est rattachée à l'interface courante. Pour comprendre le problème, considérons la figure 40 et 41 .

Deux traitements sont envisageables.

Premier traitement :

Il fait appel à quatre situations différentes survenant si deux points se situent sur un même segment appartenant à l'interface supérieure.

Soit A et D les extrémités du segment et B, C les points d'intersection lus à partir du fichier du modèle : (fig.40)

1. Si A et C sont différents des extrémités, le segment AD de l'interface supérieure est corrigé en AB. De plus, un nouveau segment apparaît d'extrémité C et D. Il comporte les mêmes informations que celles caractérisant le segment AB, hormis les points d'extrémités. Les numéros de tous les segments de l'interface sont corrigés en conséquence. Pour l'interface encours de traitement, le segment BC est attaché à la liste. Une partie des données le définissant peut être reprise du segment AB ou CD.
2. Le point C s'identifie à l'extrémité D. Le segment AD est corrigé en AB et le segment BD est attaché à la liste en cours.
3. Le point B se confond au point A. Dans ce cas, le segment intersecté est le premier de l'interface supérieure. La situation est inversée par rapport au point 2.
4. Les points B et D correspondent aux extrémités du premier segment de l'interface supérieure. Celui-ci est retiré de la liste correspondante et ajouté à la chaîne en cours de construction. Seule la vitesse V_2 présente dans les données du noeud devra être modifiée.

Deuxième traitement :

Il survient si les points d'intersection se situent sur des segments différents.

Les points A et D constituent les extrémités du premier segment intersecté contenant le point B. Les lettres E et G identifient le second segment contenant le point d'intersection F : (fig 41).

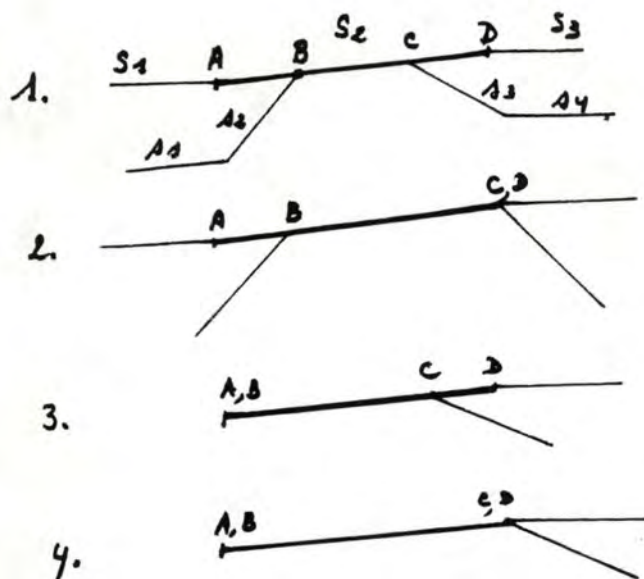


Figure 40. Quatre situations pouvant se présenter quand deux points intersectent un même segment de l'interface supérieure.

Si le point B est différent des extrémités ou s'identifie au point A, le traitement est équivalent aux situations 2 et 4 ci-dessus. Tous les segments éventuels de l'interface supérieure situé entre les deux segments intersectés sont retirés de la liste correspondante et transférés dans la chaîne courante. Seule la donnée représentant la vitesse V_2 caractérisant la couche inférieure est modifiée dans ces nouveaux noeuds. Enfin, en fonction de la position du point F, les situations 3 et 4 décrites ci-dessus sont prises en compte.

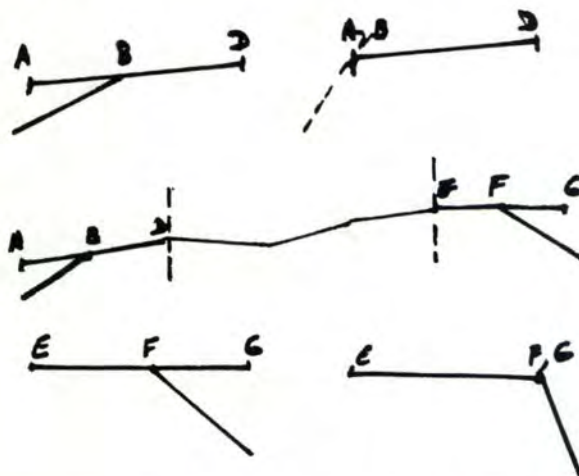


Figure 41 . Diverses situations pouvant se présenter quand deux points intersectent des segments différents dans l'interface supérieure.

Si le point d'intersection n'est pas le dernier du groupe, il faut attendre l'occurrence d'un autre point similaire ou la fin du groupe pour traiter la situation . En effet, il est nécessaire d'obtenir

certaines renseignements complémentaires concernant les autres segments de l'interface, pour mener à bien le traitement.

En fonction des traitements, le nombre de segments constituant les listes est modifié. (cfr fig.41). De plus, une gestion de chaînes parfois complexe est nécessaire. Pour la majorité des points d'intersection traités, un point triple est créé. Les informations caractérisant ces types de points sont obtenues en cours de traitement et stockée dans une liste spéciale.

4) Dès que l'ensemble des fichiers a été parcouru, une procédure de détection et d'enregistrement des points doubles est activée. Chaque liste de modèle est parcourue et les inclinaisons des segments consécutifs sont vérifiées afin de repérer ce type de point.

6.1.2. MODIFICATION DU MODELE :

L'utilisateur peut décider de transformer des interfaces du modèle afin d'améliorer la dromochronique théorique résultant du calcul des trajets des rayons. Pour ce faire, un seul contact géologique à la fois est considéré. L'utilisateur a la possibilité d'indiquer l'ensemble des segments constituant une partie ou l'entièreté de l'interface à modifier. Ensuite, les points représentant les extrémités des nouveaux segments sont introduits en veillant éventuellement à établir le raccord avec les segments non modifiés.

Ces points sont enregistrés dans le fichier de correction (p.68) qui est ensuite parcouru par une procédure dont l'objectif est de répertorier les segments transformés et de transférer les nouvelles données dans la liste attachée à l'interface . Pour ce faire, une destruction partielle ou complète de l'ancienne liste est nécessaire.

6.2. NIVEAU PROCEDURE DE CALCULS

La procédure générale dévoilée au chapitre 5 fait appel à deux procédures spéciales de traitement '**TraitRefrTot**' et '**CasSpecial**'. La structure ainsi que l'utilité de ces traitements font l'objet de ce paragraphe.

6.2.1. TRAITEMENT DE LA REFRACTION TOTALE :

La procédure '**TraitRefrTot**' à la charge de gérer la situation résultant de la réfraction totale d'un rayon sur une interface .

6.2.1.1.Principe de la procédure

Trois problèmes sont traités :

1) En fonction de la direction du rayon incident touchant l'interface et de la position du point d'intersection (XP, YP), la procédure gère le déplacement du rayon critique ment réfracté tant qu'une extrémité du segment n'est pas atteinte.

2) Au cours de sa progression le long du segment, une série de rayons réfractés est créé. Le traitement se charge de calculer la trajectoire de tous ces rayons via les différents milieux géologiques.

Pour ce faire, la procédure 'GeneralRayon' étudiée précédemment est appelée récursivement.

3) Dès que le rayon critique touche une extrémité du segment , les phénomènes attachés à la présence de points triples ou doubles doivent être considérés.

Ce sous-problème important constitué de quatre étapes est traité par la procédure '**TraitPtSpecial**' :

3.1. Le parcours des listes attachées aux points triples ou doubles permettent l'identification du point représentant l'extrémité et l'obtention d'informations concernant les différents segments créant ce type de point.

3.2. Les inclinaisons des segments exprimées dans le repère d'inclinaison sont transformées afin d'utiliser le repère zonal.

3.3. Les zones de diffraction éventuelles résultant de l'intersection entre le rayon critique ment réfracté et l'extrémité du segment sont identifiées dans le repère zonal.

2) Une condition est rencontrée. Elle détermine la direction du rayon et oriente le traitement en conséquence.

3) Un premier pas d'incrémentation est fixé . Lors d'une réfraction totale, en chaque point de l'interface un rayon réfracté est généré. Il serait trop fastidieux de calculer la trajectoire de chacun de ces rayons. Dès lors, en fonction de la profondeur de la couche, un pas est fixé ayant pour but de considérer un seul rayon par intervalle de points.

--> une série d'affectation a lieu : les coordonnées du lieu d'intersection (XP, YP) identifie la première borne de l'intervalle (XPasA, YPasA).

--> La procédure '**DetXYPas**' est activée . L'inclinaison du segment, la valeur du pas d'incrémentation et les coordonnées (XPasA, YPasA) de la borne inférieure sont utilisés afin de calculer le point (XPasN, YPasN) se trouvant sur la droite représentant le segment et identifiant l'autre extrémité de l'intervalle.

--> Si le pas de l'incrémentation aboutit à un point en dehors du segment, l'extrémité la plus proche est identifiée au point (XPasN, YPasN). La variable booléenne 'OK' reçoit la valeur 'vraie'.

4) La condition d'une boucle est rencontrée. Le rayon critique n'ayant pas dépassé une extrémité du segment, les points suivant sont pris en compte.

5) Le temps de propagation du rayon critique est calculé en fonction de la distance parcourue sur le segment . Cette distance correspond au pas d'incrémentation.

6) Deux conditions interviennent :

1. Si le temps de propagation est supérieur au temps maximum enregistré par l'ensemble des géophones, le rayon ne peut suivre un chemin minimum et est abandonné .La procédure se termine à ce niveau.

Sinon, le point correspondant à l'extrémité de l'intervalle est enregistré dans le fichier de parcours du rayon. De plus, une marque est placée à la suite de ce champ et une droite

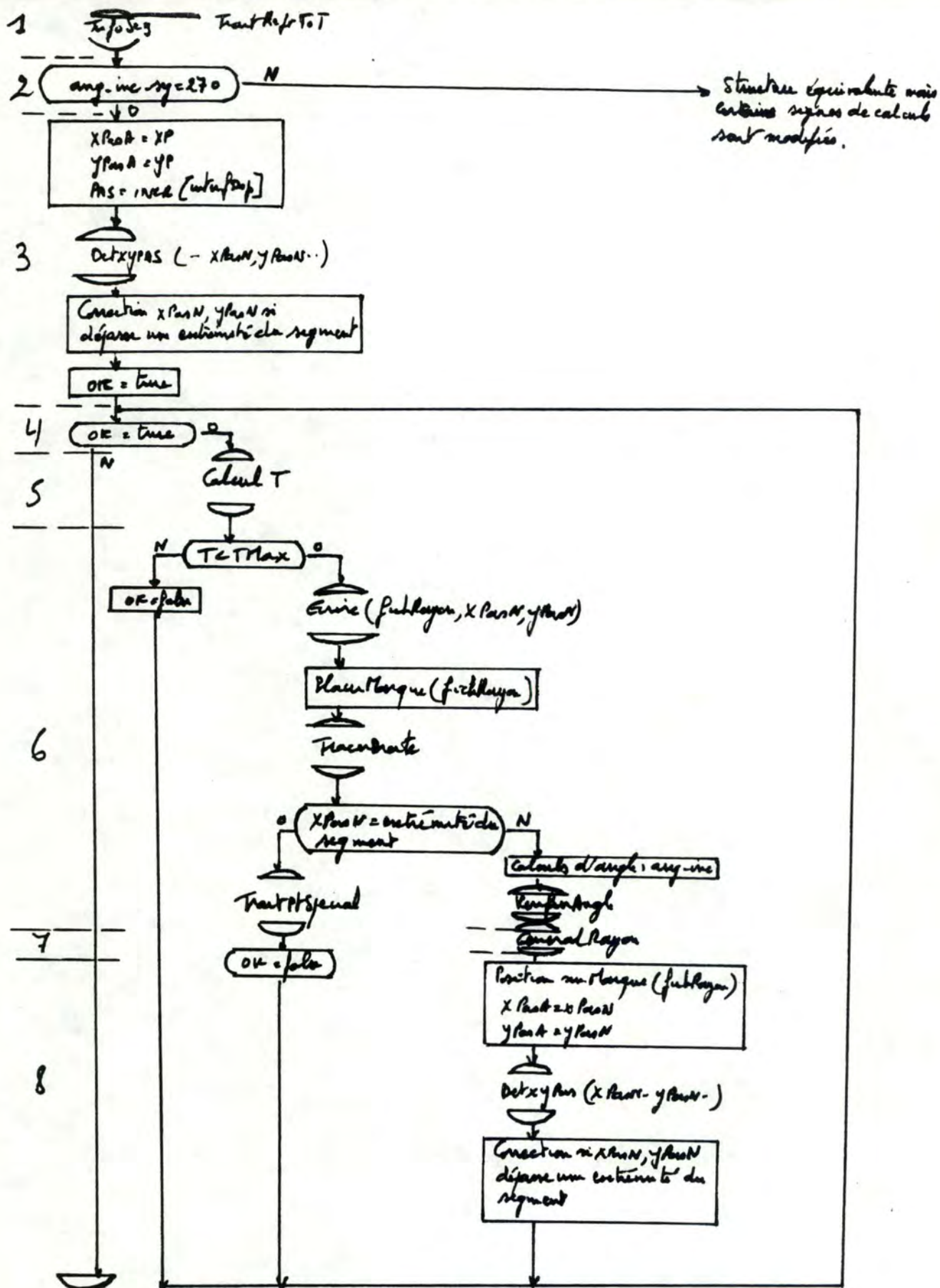


Figure 43 . Structure de la procédure 'TraitRefrTot'.

montrant la trajectoire du rayon critique sur l'interface est tracée à l'écran. La seconde condition est alors atteinte.

2. Le rayon critique frappant une extrémité du segment , les phénomènes résultant de l'interaction avec un point double ou triple sont envisagées par la procédure 'TraitPtSpécial' analysée ci-dessous.

Par contre, l'angle de réfraction du rayon réfracté est calculé si cette situation n'est pas envisagée. Dans ce cas, la procédure '**VerifierAngle**' est activée afin de transformer éventuellement la valeur de l'angle dans un intervalle compris entre 0 et 360 degrés.

7) La procédure auxiliaire 'GeneralRayon' est appelée. Son rôle consiste à calculer le temps de parcours du rayon réfracté entre les couches.

8) La gestion du rayon réfracté étant terminée, la position courante du fichier de parcours est fixée sur la marque. Le nouveau point extrémité du pas est calculé et stocké. Les étapes succédant le point 2 sont réitérées tant que le rayon critique n'atteint pas une extrémité du segment.

Remarque : les mêmes étapes constituent le traitement relatif à la négation de la condition du point 2. Seuls les signes de quelques formules sont modifiées en raison de la direction prise par le rayon critique.

6.2.1.2.2. PROCEDURE AUXILIAIRE IMPORTANTE

Le rôle de la procédure '**TraitPtSpecial**' est dévoilé.

La liste des points triples est parcourue afin de vérifier si ce type de point constitue éventuellement l'extrémité du segment . En fonction du résultat de la confrontation, la procédure 'TraitPT' ou 'TraitPD' est activée. Ces diverses procédures ayant une structure assez similaire, seule 'TraitPT' fait l'objet d'une analyse. Une description étant trop fastidieuse, les points les plus importants sont expliqués :

- 1) Une première procédure 'FixSitPT' est activée. Sa tâche principale est résumée en deux points:

--> les informations caractérisant le point triple sont disponibles.

--> les vitesses V_1 , V_2 et V_3 sont connues en fonction du segment supportant le rayon critique.

Ce traitement n'est pas utile pour la gestion d'un point double.

2) La procédure 'FixRepère' est employée pour la gestion des informations. En effet, les segments constituant le point triple possèdent une inclinaison exprimée par rapport à l'axe horizontal.

Or pour l'identification des zones de diffraction éventuelles, le segment supportant le rayon critique doit être horizontal. De plus, les deux autres segments sont identifiés par les valeurs angulaires exprimées dans un repère ayant pour origine le point triple en considérant un sens antihorlogique si le rayon se propage vers la droite, horlogique sinon. (repère zonal)

La procédure se charge de calculer ces valeurs en fonction de la position des segments.

3) Les procédures de calculs relatives aux situations décrites au chapitre 1 sont activées.

4) Une procédure 'CalcZone' est appelée pour chaque zone de diffraction créée. Sa tâche est double:

--> une procédure 'PlacerVert' exprime les limites des zones de diffraction non plus dans le repère zonal mais dans le repère standard.

--> la procédure 'GeneralRayon' se charge du calcul de la propagation de chaque rayon issu de la zone de diffraction jusqu'à ce qu'il soit abandonné ou heurte la surface.

6.2.2. TRAITEMENT D'UN CAS SPECIAL :

La procédure 'CasSpecial' est uniquement activée quand l'interface intersecté par un rayon est identique à celle contenant le point de départ.

Si le point d'interaction correspond à un point double extrémité d'un segment, la procédure est parcourue.

Une réfraction totale sur un des deux segments constituant le point double est possible si le rayon incident est compris dans une zone de diffraction. Le phénomène physique est inversé par rapport à celui étudié au chapitre 2. (fig 44).

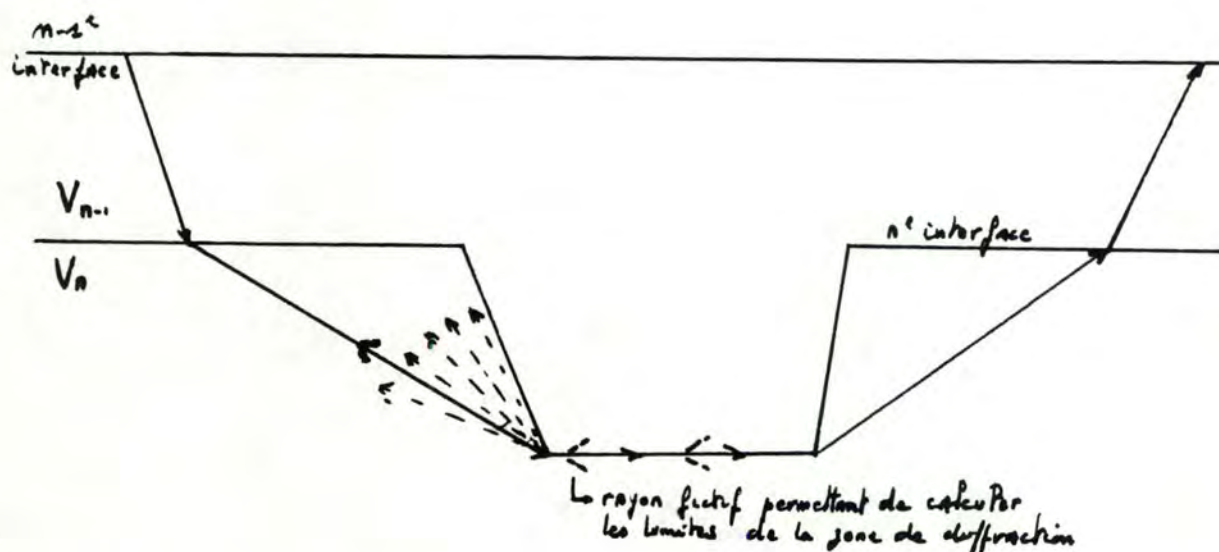


Figure 44 . Traitement relatif au cas spécial.

Par conséquent, toutes les zones sont calculées en considérant un rayon critique fictif se propageant consécutivement sur les deux segments et interagissant avec le point double. Si l'angle d'incidence du rayon exprimé dans le repère zonal est contenu entre les limites d'une zone, une réfraction critique a lieu et le boolean 'OKSnell' devient vrai.

La situation inverse conduit trivialement à la négation du boolean. L'interaction est alors simplement envisagée par la loi de Snell. Dès lors, le point double est identifié comme un point normal du segment, constituant la déclinaison, repéré par le numéro le plus faible.

Ce traitement est utile car un rayon de ce type subissant une réfraction totale emprunte généralement un chemin minimum en temps. Il est donc susceptible d'être retenu pour la construction de la dromochronique théorique.

6.2.3. SPECIFICATIONS DES PROCEDURES IMPORTANTES

Les procédures sont spécifiées par la technique d'assertions. Les arguments (données en

entrée) et résultats sont décrits ainsi que leur type.

Une brève description des procédures a été donnée dans les paragraphes précédents.

Procédure 'TraitRefrTot' :

argument :

pch : pointeurSeg
interDep, seg, XP, YP : integer
arg-inc, ang-inc-seg, ART : real

précondition :

- XP, YP identifie le point d'intersection du rayon et du segment de numéro 'seg'.
- L'interface de numéro 'interfDep' contient le segment intersecté.
- ang-inc identifie le rayon dans le repère standard. $0^\circ \leq \text{ang-inc} \leq 360^\circ$
- ang-inc-seg identifie le rayon dans le repère standard modifié
ang-inc-seg est égale à 90 ou 270 degrés.
- ART correspond à l'angle critique calculé par la loi de Snell.
 $0^\circ \leq \text{ART} \leq 90^\circ$
- pch est un pointeur vers le noeud de la chaîne contenant les informations du segment de numéro 'segm'.

résultats : /

postcondition :

- Les trajets des rayons réfractés générés par le rayon critique sont calculés en temps en fonction des couches géologiques traversées. Le parcours d'un rayon atteignant un géophone en un temps minimum est enregistré dans la liste correspondante.
- Quand un rayon critique atteint l'extrémité de l'interface, les situations attachées à la présence des points doubles ou triples sont considérées. Le parcours des rayons issus des zones de diffraction éventuelles sont également calculé et font l'objet d'un enregistrement si le temps est minimum.

Procédure 'DetXYPas':

argument :

$X_1, X_2, Y_1, Y_2, \text{Pas}, \text{XPas}, \text{YPas}$: integer

Angle : real

postcondition :

- X_1, X_2 et Y_1, Y_2 représentent les extrémités du segment intersecté.
- Le point identifié par les coordonnées ($\text{XPasA}, \text{YPasA}$) se trouve sur le segment.
- Pas est une valeur positive déterminant le glissement du rayon critique sur l'interface. La valeur dépend du contact géologique considéré.
- angle représente l'inclinaison du segment.

résultat :

$\text{XPasN}, \text{YPasN}$: integer

postcondition :

- XPasN et YPasN sont calculés en fonction de la valeur de XPasA et YPasA dans le repère, de l'inclinaison du segment et de la direction du rayon critique. Ces coordonnées identifient un point se trouvant sur la droite représentant le segment. Il devient l'origine d'un nouveau rayon réfracté et détermine également la position atteinte par le rayon critique sur l'interface.

Procédure 'TraitPtSpecial' :

argument :

pch : pointeurSeg

ang-inc-seg, V_1, V_2 : real

interfDep, seg, XPS, YPS : integer

précondition :

- pch pointe vers le noeud d'une liste contenant les informations caractérisant le segment intersecté.

- XPS, YPS sont les coordonnées du point spécial extrémité du segment de numéro 'seg' compris dans l'interface 'interfDep'.
- ang-inc-seg identifie le rayon critique dans le repère standard modifié.
Ang-inc-seg vaut 90° ou 270° .
- V_1 et V_2 sont les vitesses des couches formant l'interface. Le rayon critique se propage dans la couche de vitesse V_2 .

résultat : /

postcondition :

Les trajets des rayons issus des zones de diffractions éventuelles résultant de la présence d'un point triple ou double sont calculés en temps et font l'objet d'enregistrement si le rayon touche un géophone en un temps minimum.

Procédure 'CasSpecial' :

argument :

interfDep, XP, YP : integer

V_1 , V_2 , ang-inc-seg, ang-inc-ang-refr : real

OKSnell : boolean.

précondition :

- XP, YP représentent les coordonnées du point d'intersection contenu dans l'interface de numéro 'interfDep'.
- OKSnell est faux.
- ang-inc identifie le rayon dans le repère standard. $0^\circ \leq \text{ang-inc} \leq 360^\circ$
- ang-inc-seg et ang-refr sont attachés au rayon dans le repère standard modifié.
 $0^\circ \leq \text{ang-inc-seg} \leq 360^\circ$ et $0^\circ \leq \text{ang-refr} \leq 190^\circ$
- V_1 et V_2 caractérisent les vitesses des couches de part et d'autre de l'interface. Le rayon incident se situe dans le milieu V_1 .

résultat :

ang-inc-seg, ang-refr, ang-inc : real

OKSnell : boolean

postcondition :

- OKSnell est vrai : une réfraction critique sur un des segments constituant le point double identifié par (XP, YP) a lieu. Dans ce cas , ang-inc-seg vaut 90° ou 270° et ang-refr vaut 90° ou -90° en fonction de la direction du rayon critique.
- OKSnell est faux : les arguments en entrée ne sont pas modifiés.

CHAPITRE 7

CRITIQUE DU LOGICIEL

Les hypothèses posées, les avantages et inconvénients du logiciel ainsi que les perfectionnements envisagés sont décrits dans ce chapitre. De plus, une comparaison avec quelques logiciels existants est réalisée.

7.1 HYPOTHESES POSEES

Le logiciel de réfraction sismique se base sur une série d'hypothèses concernant l'introduction de données ou les calculs envisagés pour les trajectoires des rayons dans le modèle. Les chapitres précédents les ayant déjà mentionnés, il est néanmoins nécessaire de les rassembler dans ce paragraphe afin de juger de leur nombre et de leur importance:

1) Hypothèses suivies en réfraction sismique:

- les différentes couches du sous-sol sont homogènes et isotropes;
- le dispositif sismique, constitué par les points d'ébranlement et les récepteurs, est rectiligne;
- les différents contacts géologiques, ou interfaces, admettent le même plan perpendiculaire passant par le dispositif sismique et seuls les trajets sismiques situés dans ce plan sont pris en considération;
- la vitesse de la couche n est supérieure à celle de la couche $n-1$ afin qu'il puisse y avoir réfraction totale. Néanmoins, l'effet de couches à vitesse plus lente est également pris en considération;
- les temps reportés sur les diverses courbes correspondent aux ondes atteignant les premières les récepteurs.

2) Lors de l'introduction des résultats expérimentaux, chaque dromochronique se compose au maximum de 36 points: le premier représente l'instant zéro enregistré à la source des rayons sismiques, les autres, les temps des arrivées premières des ondes aux géophones;

4) Chaque contact géologique est approximé par un ensemble de segments épousant au mieux les irrégularités des configurations;

5) Avant toute activation de la procédure de calcul permettant la détermination des trajectoires des rayons dans le modèle, le point d'impact doit être situé sur la surface ou dans la première couche uniquement;

6) Un rayon direct issu de la source et atteignant un géophone ne transite par aucune interface autre que la surface;

7) Dès qu'une réfraction critique est décelée par un rayon incident, la gestion de ce phénomène se limite uniquement au segment intersecté;

8) Les zones de diffraction sont considérées si les points spéciaux sont atteints par un rayon critique réfracté;

9) Un point triple est formé par la rencontre de deux ou trois interfaces maximum;

10) Quatre paramètres ayant des répercussions importantes sur l'enregistrement des données et le calcul de la dromochronique théorique interviennent dans le programme:

Au niveau de l'interface:

Lors de la création du terrain, l'utilisateur introduit à l'aide de la souris les différents points constituant les extrémités des segments. L'apparition d'un point triple impose la localisation d'un point sur l'interface supérieure. La représentation d'un point à l'écran étant inférieure au millimètre, la probabilité pour que celui introduit se situe exactement sur le segment est très faible. Dès lors, une **zone d'incertitude** représentée par un carré de quelques millimètres

de côté centré sur le point est utilisé. Si cette zone est traversée par le segment, l'intersection à lieu et les coordonnées du point sont modifiées afin de les ajuster au point le plus proche appartenant au segment.

Un paramètre important fixe la taille de la zone d'incertitude utilisée.

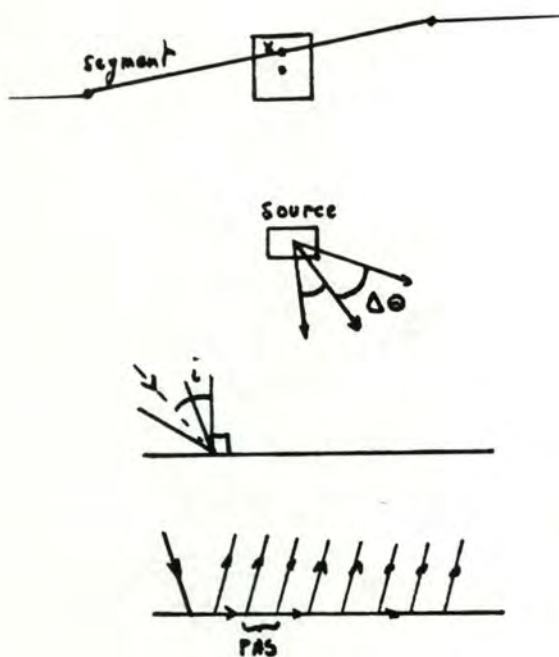
Au niveau de la procédure de calculs:

1. Tous les rayons issus du point d'impact sont identifiés par un angle d'incidence exprimé dans le repère standard. La procédure ayant déterminé le parcours d'un rayon, une **incrémentation angulaire** permet de sélectionner le rayon suivant. Une incrémentation très fine provoque le calcul d'un plus grand nombre de rayons mais fournit une courbe théorique plus précise. La valeur de cette incrémentation angulaire constitue un deuxième paramètre.

2. La probabilité pour qu'un rayon intersecte un segment avec un angle d'incidence équivalent à l'angle critique est très faible. Dès lors, un **intervalle d'incertitude angulaire** centré sur la valeur critique est fixé. Un rayon ayant un angle d'incidence compris dans l'intervalle subira une réfraction totale sur l'interface rencontré.
La valeur de cette intervalle constitue le troisième paramètre.

3. Lors d'une réfraction totale un ensemble de rayons réfractés sont générés en chaque point de l'interface en fonction du déplacement du rayon critique. Un **pas d'incrémentation** est utilisé pour considérer les trajets d'une partie seulement de ces rayons. La gestion de la situation est ainsi facilitée.
L'ensemble des valeurs des pas pour les interfaces constitue le quatrième paramètre.

La figure 44 montre l'utilité des différents paramètres.



Carré centré sur le point introduit par l'utilisateur. L'intersection est détectée. Le point sera identifié au point x sur le segment.

Incrémentation angulaire identifiant un nouveau rayon issu de la source

Intervalle d'incertitude centré sur la valeur de l'angle critique. Tout rayons arrivant dans ce cône subit une réfraction totale.

Pas d'incréméntation utilisé lors de la gestion d'une réfraction totale.

Figure 44 . Utilisation des paramètres importants.

11) Lors de la détermination des trajets des rayons, un rayon est abandonné si une des conditions suivantes survient:

- Le rayon quitte le modèle de terrains introduit par l'utilisateur;
- la surface est atteinte;
- les conditions de Snell ne sont pas respectées ou une inversion de couche provoque une réfraction totale;
- le temps de parcours du rayon n'est pas minimum.

7.2 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

7.2.1 AVANTAGES

- 1) Le modèle de terrains est modifié par l'utilisateur et non automatiquement par le programme. Par conséquent, des erreurs relatives à l'estimation des profondeurs de

certaines configurations géologiques complexes dues à l'application de méthodes basées sur l'analyse des courbes expérimentales sont évitées.

- 2) Aucune limite théorique n'est fixée pour le nombre de dromochronique expérimentale introduite par l'utilisateur.
- 3) Les milieux géologiques représentant le modèle ne sont pas nécessairement disposés en couches superposées. La figure 35 illustre les différentes représentations possibles d'interfaces .
- 4) Les irrégularités importantes présentes dans une interface sont approximées par une série de segments et interviennent pour l'évaluation des trajets des rayons sismiques dans le modèle.
- 5) Les points triples résultant de la rencontre d'interfaces sont considérés à tous les niveaux du modèle.
- 6) L'interface réalisée facilite le travail de l'utilisateur pour l'introduction des données concernant les résultats expérimentaux, la création et la correction du modèle. L'emploi de la souris du Macintosh évite l'utilisation du clavier numérique lors de l'enregistrement de données. Une description détaillée des possibilités et limites de l'interface est présentée dans le fascicule contenant le mode d'emploi du logiciel.
- 7) Un des avantages les plus importants réside dans la facilité de modifier le programme. Par exemple, si la théorie concernant les points spéciaux comporte des erreurs ou s'avère incomplète, seules quelques primitives du module ' Calcul des rayons' de l'architecture logique (p.56) devraient être corrigées. De plus, cette modification pourrait s'effectuer en quelques heures.

7.2.2 DESAVANTAGES

- 1) Une manipulation précise du logiciel nécessite de la part de l'utilisateur de solides connaissances géophysiques. En effet, il doit déduire, à partir des courbes expérimentales, les modifications à apporter au modèle afin d'améliorer les courbes théoriques.
- 2) Les zones de diffraction sont calculées uniquement lors de la rencontre d'un point spécial et d'un rayon subissant une réfraction critique. Il serait également intéressant de considérer l'interaction avec un rayon quelconque. Malheureusement, cette situation n'est pas analysée en détail par le logiciel.
- 3) En fonction des valeurs choisies pour les quatre paramètres importants intervenant dans le logiciel, des résultats de qualités différentes peuvent être obtenus.
- 4) Lors de la correction du modèle par l'utilisateur, les positions des points triples enregistrés au départ ne peuvent être modifiées. La gestion de ce type de point étant assez complexe, le logiciel permet la modification de la forme des segments les constituant mais empêche l'annulation ou le déplacement du point. Cette restriction représente un des désavantages majeurs.
- 5) L'énergie des rayons issus de la source s'amenuise lors de la pénétration dans les couches géologiques. De même, les rayons diffractés ou réfractés sont nécessairement moins énergétiques que le rayon qui les génère. Des programmes tiennent compte de ces affaiblissements énergétiques permettant ainsi la suppression de certains rayons. (ref.[11],[14]). Ce critère de sélection n'est pas retenu par le logiciel. Néanmoins, l'énergie perdue étant étroitement liée au trajet parcouru, la probabilité pour qu'un rayon très faiblement énergétique atteigne le premier un géophone est assez faible.
- 6) Pour un segment d'une interface, un seul rayon incident issu de la source subit une réfraction totale. En fonction de la valeur de l'intervalle d'incertitude angulaire, il se peut qu'un ensemble de rayons respecte la condition de réfraction totale. Dès lors, chacun

d'eux fait l'objet d'une analyse augmentant ainsi sensiblement le temps de calcul pour l'obtention de la dromochronique théorique.

7.3 PERFECTIONNEMENTS ENVISAGES

- 1) La résolution des différents inconvénients exposés dans le paragraphe précédent constitue un premier perfectionnement indispensable.
- 2) Des routines d'impression précisant les coordonnées des points formant les courbes expérimentales et théoriques ainsi que les extrémités des segments constituant les interfaces du modèle peuvent être créées.
- 3) Une amélioration de l'interface est possible afin de faciliter le travail de l'utilisateur. L'apparition de message d'erreurs lors d'une mauvaise manipulation constitue une facilité supplémentaire.
- 4) Une des tâches importantes de l'utilisateur consiste , à partir des courbes expérimentales, à rechercher le nombre de couches présentes dans le sous-sol ainsi que leur vitesse. Une amélioration du programme aurait pour but de générer automatiquement ces informations.
- 5) Les positions des géophones en surface peuvent être déduites immédiatement des courbes expérimentales. Dès lors, pour un dispositif sismique donné, seule la localisation précise de la source est nécessaire afin d'initialiser la procédure de calculs des trajectoires des rayons .
- 6) Enfin, une optimisation du temps d'exécution du programme est indispensable. Elle constitue un des perfectionnements les plus importants.

7.4 COMPARAISONS EFFECTUEES

En 1972, J. Scott et R. Burdick mirent au point un programme de réfraction sismique permettant l'obtention d'un profil de terrains.(réf.[13])

Les données principales introduites à l'aide de cartes perforées étaient les suivantes:

- Les coordonnées précises des points d'impact et des géophones pour chaque dispositif sismique; un dispositif ne pouvant comprendre plus de douze géophones.
- Les temps de parcours des ondes en rapport avec les couches dans lesquelles s'est réalisée la réfraction.
- Eventuellement, les vitesses de chaque milieu. Celles-ci sont déduites des résultats expérimentaux si elles ne sont pas mentionnées.

A partir d'un modèle rudimentaire composé de deux droites horizontales représentant la surface et la première interface en profondeur, une procédure de calculs détermine les points d'entrance et d'émergence dans le second milieu de rayons subissant une réfraction totale. Les temps de parcours obtenus sont confrontés aux données expérimentales. Dès lors, la forme de l'interface en profondeur est modifiée automatiquement par le programme afin de minimiser les différences existant entre les résultats théoriques et expérimentaux. Cette approximation est réalisée en activant successivement la procédure de calculs après chaque modification effectuée.

La forme de la seconde interface étant fixée, ce processus est exécuté de nouveau pour chaque contact géologique supplémentaire représenté initialement par une droite horizontale.

Le processus se termine dès que le profil est entièrement défini.

Cette méthode présente néanmoins quelques inconvénients:

- La présence de couches lentes est traitée de manière artificielle. L'utilisateur doit combiner les profondeurs de la couche lente et du milieu supérieur et attribuer à la nouvelle couche ainsi formée une vitesse égale à la moyenne des vitesses respectives des anciennes couches.
- Les milieux géologiques doivent nécessairement se présenter sous forme de couches superposées.
- Les zones de diffraction éventuelles résultant de la présence de points spéciaux ne sont

pas considérées.

- La modification automatique du modèle de terrains basée sur l'analyse des résultats expérimentaux peut générer des erreurs importantes sur l'estimation des profondeurs de certaines couches.

Un autre programme réalisé par N. Yacoub et J.Scott se basent sur une autre technique.
(réf.[11])

Un modèle de terrains décrit par des coordonnées enregistrées sur cartes perforées est fourni par l'utilisateur . Les trajectoires d'un ensemble de rayons issu du point d'impact ,correspondant aux ondes longitudinales et transversales sont déterminées ainsi que les pertes d'énergie dues aux différentes interaction. Néanmoins, le programme ne tient pas compte de la rencontre d'interfaces ni de l'existence possible de zones de diffraction.

Une description plus détaillée ainsi qu'un autre programme intéressant mis au point par ces auteurs peuvent être trouvés aux références [11] et [14].

CONCLUSION

Le but de ce travail consistait à réaliser un logiciel de réfraction sismique permettant l'obtention d'un profil des configurations géologiques présentes dans le sous-sol étudié.

Pour ce faire, les temps de parcours de rayons se propageant dans le modèle de terrains introduit par l'utilisateur sont déterminés. La confrontation des courbes expérimentales et théoriques permet une correction manuelle éventuelle du modèle. L'approximation des courbes étant jugée satisfaisante, le profil obtenu est susceptible de correspondre à la situation géologique réelle.

Les avantages de la méthode employée sont nombreux: Les problèmes résultant des irrégularités importantes des couches géologiques, de la présence de terrains lents ainsi que de la rencontre de plusieurs interfaces séparant les milieux géologiques sont traités par le programme.

Néanmoins, un temps d'exécution relativement important ainsi que la nécessité pour l'utilisateur de disposer de sérieuses connaissances géophysiques peuvent être perçues comme des inconvénients majeurs.

J'espère qu'une amélioration future permettra de remédier à ces quelques faiblesses.

C'est le souhait que je formule au terme de ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Geophysique appliquée à l'hydrogéologie.
Jean-Louis ASTIER. Masson et Cie Edition.
- [2] Physique générale: Mouvements vibratoires et ondes mécaniques.
Georges. CARDINAEL. Syllabus FNDP 1982.
- [3] Shallow Refraction Seismics.
Bengt SJOGREN. Chapman and Hell Ltd, London Ed.
- [4] Introduction to Geophysical Prospecting.
M.B. DOBRIN. McGraw Hill, New-York Ed.
- [5] Inside Macintosh.
Apple Computer Inc. 1984.
- [6] Turbo Pascal for The Mac.
Borland Ed.
- [7] Programmez en Pascal sur Macintosh.
François LONGEVIALLE. Edimicro Ed. 1985
- [8] Programmez votre Macintosh.
Alain ANDRIEUX, Christophe DROULERS. McGraw Hill Ed. 1985
- [9] Formulaire de mathématiques.
L. CHAMBADAL. Gauthiers-Villars Ed.
- [10] Méthodologie et développement de logiciels.
Axel Van LAMSWEERDE. Notes de cours.
- [11] Computer Ray Tracing through Complex Geological Models for Ground Motion Studies.
N.K.YACOUB, J.H. SCOTT, F.A. MCKEOWN. GeoPhysics, vol.35, n°4, 1970.
- [12] An Areal Plan of Mapping SubSurface Structure by Refraction Shooting.
L.W. GARDNER. GeoPhysics 1939, Vol 4, n°4
- [13] Computer Analysis of Seismics Refraction Data.
J.H. SCOTT, R.G. BURDICK. Bureau of Mines. Report of Investigations 7595.
U.S. Dept. of The Interior.

- [14] A Computer Program to Trace Seismic Ray Distribution in Complex Two-Dimensional Geological Models.
N.K. YACOUN, J.H. SCOTT.